



**José Alberto Oliveira Lima**

Mestre

## **Modelização Conceptual de Sistemas de Energia em Edifícios**

Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em  
Engenharia Eletrotécnica e Computadores

Orientador: Prof. Dr. João F. Martins, FCT-UNL

Co-orientador: Prof. Dr. Celson P. Lima, UFOPA

Juri: Prof. Dr. Luís M. Camarinha Matos (Presidente)  
Prof. Dr. Aníbal Traça de Carvalho Almeida  
Prof. Dr. António Carlos S. Machado e Moura  
Prof. Dr. Paulo J. O. Rupino da Cunha  
Prof. Dr. José A. Barata de Oliveira  
Prof. Dra. Anabela M. Gonçalves Pronto



**Maio, 2016**



## **Modelização Conceptual de Sistemas de Energia em Edifícios**

Copyright © José Lima, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta tese de doutoramento através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.





Aos meus Pais  
e à Susana



## Agradecimentos

É difícil expressar por palavras o esforço, a dedicação e a força de vontade que se revelaram necessários para completar o trabalho descrito nesta tese de doutoramento. Facilmente se retrata este Capítulo da minha vida com a analogia a uma longa maratona onde o atleta corre, não como um indivíduo, mas como um grupo de pessoas dedicadas que o fortalecem com a sua amizade, energia e orientação. Terminar a corrida traz apenas reconhecimento para a parte individual, o atleta. Desistir significa perder não só como indivíduo, mas como grupo. Trata-se de uma iniciativa pouco justa, com contrapartidas apenas para o atleta, sem benefício para o restante grupo. Este texto serve, assim, como uma ínfima porção do reconhecimento merecido por todo o grupo de pessoas que me acompanhou e acompanha neste percurso.

Em primeiro lugar agradeço ao meu orientador científico e mentor Prof. João Martins. Reconheço a sua disponibilidade incondicional, compreensão, esforço e incentivo, fundamentais para levar este trabalho a bom porto. As suas sugestões e as suas críticas ajudaram-me a encontrar a rota certa e contribuíram para o fortalecimento dos pilares deste trabalho. As inúmeras reuniões, no seu gabinete, foram sempre extremamente esclarecedoras e tiveram especial importância em momentos de dúvida sobre a escolha deste trajeto pessoal. Reconheço, ainda, toda a confiança que me foi depositada em projetos de investigação e todas as oportunidades e condições que me possibilitaram executar este trabalho.

Agradeço ao meu co-orientador científico, Prof. Celson Lima, pelas suas críticas construtivas, discussões e sugestões. Apesar de ter estado, a maior parte do tempo, a um oceano de distância, o Prof. Celson Lima sempre esteve disponível para esclarecer as minhas questões. A sua extrema perseverança foi fundamental para que fossem tomadas decisões acertadas sobre o caminho a tomar no trabalho desenvolvido.

Agradeço aos elementos da Comissão de Acompanhamento da Tese, Prof. Paulo Rupino e Prof. José Barata, pelas críticas e sugestões de melhoria para este trabalho. Agradeço, ainda, ao Prof. José Barata pela oportunidade e confiança depositada em mim no projeto de investigação NEMO&CODED.

Agradeço ao Prof. Ricardo Gonçalves, pela oportunidade e confiança depositadas nos projetos de investigação PRODUTECH, IMAGINE e AQUASMART.

Reconheço as disponibilidades do Prof. Aníbal Traça de Almeida e da Dra. Anabela Carvalho, da Universidade de Coimbra, que me facultaram o acesso a informação sobre o sistema de aproveitamento geotérmico para climatização do edifício Fábrica dos Mirandas, essencial para a validação deste trabalho.

Agradeço ao Prof. Pedro Pereira, pela ajuda na instalação e manutenção do sistema de monitorização de analisadores de energia no edifício do Departamento de Engenharia Eletrotécnica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e pelas inúmeras visitas ao terraço do edifício.

Reconheço a disponibilidade da Eng.<sup>a</sup> Cláudia Saque, da Secção de Segurança da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, no fornecimento de dados de ocupação do parque de estacionamento do *campus*.

Também os meus colegas de doutoramento e do UNINOVA tiveram um papel fundamental na conclusão deste trabalho. Foi com eles que partilhei, não só a minha segunda casa, como todas as inúmeras questões e preocupações existenciais inerentes ao doutoramento. O Francisco Ganhão, pelo seu companheirismo e por ser indivíduo brilhante, não só em termos académicos, mas como ser humano. O Vasco Gomes, pelo papel fundamental que teve no desenvolvimento do nosso trabalho conjunto e que se traduziram em publicações muito relevantes. O Rui Lopes, companheiro de iniciativas empreendedoras. Outros nomes de colegas que merecem ser referidos: David Inácio, Pedro Magalhães, José Ferreira e Carlos Raposo.

Agradeço a toda a equipa da Geratriz e, em especial, ao seu gestor Eng. Gustavo Pita pela oportunidade de participar no desenvolvimento do projeto *Wemeter*, pela confiança depositada em mim no decorrer do projeto e pela amizade e respeito partilhados ao longo de quase quatro anos. Agradeço ao Raúl, mais conhecido como *Data Nerd*, pelas inúmeras horas partilhadas no desenvolvimento deste projeto e por toda a ajuda técnica que me providenciou durante o doutoramento.

Ao meu colega sérvio Dimitrije Manic, que me acolheu com amizade e companheirismo durante a minha colaboração com a Universidade de Belgrado.

Aos meus amigos que verdadeiramente demonstraram o quanto acreditam em mim, nunca duvidando da minha capacidade para terminar este trabalho e sempre compreendendo as minhas noites e fins-de-semana “enclausurado”. Um muito obrigado por me manterem mentalmente são durante todo este tempo.

Finalmente, e mais importante, um agradecimento muito especial aos meus pais e à Susana. Não existem palavras para descrever o seu apoio incondicional a todos os níveis. Sem eles não teria sido possível sequer começar esta jornada. É a eles que dedico este trabalho.

A todas as pessoas que me esqueci de referir e que contribuíram de alguma forma para este trabalho, o meu muito obrigado.

## Resumo

A próxima geração de edifícios terá necessariamente de providenciar uma utilização mais eficiente dos recursos energéticos. A necessidade de redução de custos com energia em conjunto com políticas nacionais e mundiais de redução de emissões de carbono exige a aplicação de medidas que, entre outras, passam pela melhoria das decisões operacionais em edifícios ao nível de eficiência energética. A modelização de sistemas surge como um elemento fundamental, principalmente para sistemas que afetam o balanço energético do edifício. O desenvolvimento de modelos que permitam simular o perfil de consumo do edifício em função de diversos fatores inerentes ao mesmo, sejam eles externos (por exemplo, condições meteorológicas) ou internos (por exemplo, a ocupação do edifício), estabelecerá a ponte entre a monitorização dinâmica de consumos e o suporte a decisões operacionais no edifício, tornando-as mais eficazes. O recurso à modelização conceptual é uma forma de facilitar e melhorar o desenvolvimento de modelos de simulação. Neste âmbito é proposto um modelo conceptual que, a partir de conceitos fundamentais inerentes ao balanço energético em edifícios (edifício, utilizador, dispositivo, contexto e energia), descreve os vários sistemas que têm influência no balanço energético de edifícios e suas inter-relações de forma estruturada e genérica. É proposta uma abordagem de submodelização a partir da instanciação qualitativa e quantitativa de submodelos, que simplifica o desenvolvimento de modelos de simulação para sistemas complexos. A instanciação qualitativa, assente numa abordagem de modelização composicional, permite a identificação das variáveis, fatores e relações relevantes para o modelo de simulação. A modelização quantitativa transpõe as instâncias qualitativas para um ambiente computacional sob forma de blocos inter-relacionáveis. O modelo conceptual e respetiva abordagem de submodelização são validados em três cenários de teste real, nomeadamente: sistema de climatização com base em aproveitamento geotérmico; sistema de aproveitamento fotovoltaico para produção de energia elétrica; e quadro geral de baixa tensão de um edifício. Em cada cenário são desenvolvidos modelos de simulação de produção e consumo energético em edifícios, recorrendo à utilização de históricos de monitorização e à utilização de redes neuronais artificiais.



# Abstract

The future generation of buildings must improve the use of energy resources. As the improvement of energy efficiency in buildings becomes increasingly important, and national and world-wide policies enforce the reduction of carbon emissions, measures to improve the operational decisions in buildings become also necessary. System modelling arises as a fundamental element, especially for systems that influence the building's energy balance. The development of models that allow to simulate energy consumption patterns according to their intrinsic different factors, external (e. g. weather conditions) or internal (e. g. building occupancy), will fill the gap between dynamic consumption monitoring and the building's operational decision support, improving their effectiveness.

Conceptual modelling provides means to ease and improve the development of simulation models. In this context, this thesis proposes a conceptual model which describes the different systems with influence in the building energy balance and their relationships, from specific fundamental concepts inherent to the energy balance in buildings (building, user, device, context and energy). A submodelling approach is proposed, based on the qualitative and quantitative instantiation of submodels, which simplifies the development of simulation models for complex systems. The qualitative instantiation, supported by a compositional modelling approach, enables the identification of variables, factors and relationships that are relevant for the simulation model. The quantitative modelling transposes the qualitative instances into a computational environment, as inter-relational blocks. The conceptual model and its respective submodelling approach are validated in three real test-case scenarios, namely: a geothermal-based an air conditioning system; a photovoltaic solar system; and the low-voltage distribution board of a building. In each test-case, several simulation models are developed for energy production and consumption, using monitoring data and artificial neural networks.





# Índice

<b>Agradecimentos.....</b>	<b>VII</b>
<b>Resumo.....</b>	<b>IX</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>X</b>
<b>Índice .....</b>	<b>XIII</b>
<b>Lista de figuras .....</b>	<b>XV</b>
<b>Lista de tabelas.....</b>	<b>XIX</b>
<b>Acrónimos .....</b>	<b>XXI</b>
<b>Capítulo 1 - Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1. Enquadramento e motivação.....	1
1.2. Questão de investigação .....	2
1.3. Contribuições.....	3
1.4. Estrutura da tese .....	4
<b>Capítulo 2 - Eficiência energética em edifícios.....</b>	<b>5</b>
2.1. Balanço energético .....	5
2.1.1. Edifício.....	6
2.1.1.1. Condições estruturais.....	6
2.1.1.2. Conforto.....	7
2.1.2. Utilizadores.....	8
2.1.3. Contexto .....	10
2.1.3.1. Meteorológico .....	10
2.1.3.2. Económico.....	11
2.1.4. Sistemas de consumo e de aproveitamento renovável .....	11
2.1.5. Síntese do balanço energético em edifícios .....	12
2.2. Modelização energética.....	13
2.3. Apoio à decisão para gestão de energia .....	15
<b>Capítulo 3 - Modelização conceptual de edifícios como sistemas de energia.....</b>	<b>19</b>
3.1. Conceitos fundamentais .....	19
3.2. Modelização de sistemas energéticos.....	20
3.3. Especificação do modelo conceptual .....	26
3.3.1. Aspetos gerais e operacionalização do modelo conceptual .....	26
3.3.2. Conceitos do modelo .....	29
3.3.2.1. Edifício.....	30
3.3.2.2. Utilizador.....	32
3.3.2.3. Dispositivo .....	33
3.3.2.4. Contexto .....	35
3.3.2.5. Energia .....	36
3.4. Processo de instanciação do modelo conceptual .....	38
3.4.1. Abordagem de submodelização.....	38
3.4.2. Fases de instanciação .....	38

3.4.3.	Descrição de submodelos .....	42
3.4.4.	Modelização qualitativa .....	44
3.4.4.1.	Modelização composicional.....	44
3.4.4.2.	Abordagem composicional para instanciação qualitativa .....	47
3.4.5.	Modelização quantitativa.....	53
<b>Capítulo 4 - Aplicações do modelo conceptual .....</b>		<b>55</b>
4.1.	Descrição do cenário de modelização.....	55
4.2.	Sistema de monitorização de energia .....	55
4.3.	Sistema de aproveitamento geotérmico com bomba de calor .....	61
4.3.1.	Caracterização do sistema.....	61
4.3.2.	Descrição do submodelo.....	63
4.3.3.	Instâncias qualitativas do modelo conceptual .....	64
4.3.3.1.	Influência do contexto temporal no consumo de energia elétrica .....	66
4.3.3.2.	Influência do contexto meteorológico no consumo de energia .....	66
4.3.3.3.	Influência do contexto geológico no consumo de energia elétrica.....	68
4.3.4.	Modelos de simulação qualitativos .....	68
4.3.4.1.	Influência do contexto temporal no consumo de energia elétrica .....	71
4.3.4.2.	Influência do contexto meteorológico no consumo de energia .....	73
4.3.4.3.	Influência do contexto geológico no consumo de energia .....	74
4.3.5.	Instâncias quantitativas do modelo conceptual.....	76
4.3.6.	Modelos de simulação quantitativos .....	77
4.4.	Sistema de aproveitamento solar fotovoltaico .....	80
4.4.1.	Caracterização do sistema.....	80
4.4.2.	Descrição do submodelo.....	81
4.4.3.	Instâncias qualitativas do modelo conceptual.....	82
4.4.3.1.	Influência do contexto meteorológico na produção de energia .....	83
4.4.3.2.	Influência do contexto temporal na produção de energia elétrica .....	84
4.4.4.	Modelos de simulação qualitativos .....	84
4.4.5.	Instâncias quantitativas do modelo conceptual.....	86
4.4.5.1.	Modelos de simulação quantitativos.....	87
4.5.	Consumo elétrico de um edifício .....	89
4.5.1.	Caracterização do sistema.....	89
4.5.2.	Descrição do submodelo.....	92
4.5.3.	Instâncias qualitativas do modelo conceptual.....	93
4.5.3.1.	Influência do conjunto contexto temporal e ocupação do parque de estacionamento na ocupação do edifício .....	94
4.5.3.2.	Influência do conjunto contexto temporal e ocupação do edifício no balanço elétrico do edifício .....	94
4.5.4.	Modelos de simulação qualitativos .....	95
4.5.5.	Instâncias quantitativas do modelo conceptual.....	97
4.5.6.	Modelos de simulação quantitativos .....	99
4.5.6.1.	Influência do conjunto contexto temporal e lotação do parque de estacionamento na ocupação do edifício .....	99
4.5.6.2.	Influência do conjunto contexto temporal e da ocupação no consumo elétrico do edifício .....	102
4.5.6.3.	Influência do contexto temporal no consumo elétrico do edifício .....	103
4.6.	Validação do modelo conceptual.....	105
<b>Capítulo 5 - Conclusões .....</b>		<b>107</b>
5.1.	Visão geral da tese.....	107
5.2.	Resultados.....	108
5.3.	Trabalho futuro .....	112
<b>Bibliografia .....</b>		<b>113</b>

## Lista de figuras

Figura 1 - Perfis de ocupação para dias úteis e fins-de-semana para um edifício administrativo [29].	9
Figura 2 - Perfis de ocupação para dias úteis e fins-de-semana de uma biblioteca [29].	9
Figura 3 - Processo de apoio à decisão [64].	16
Figura 4 - Modelização conceptual	20
Figura 5 - Esquema tridimensional das fronteiras do sistema para cálculo de energia interna [79].	21
Figura 6 - Modelo térmico numérico [80].	22
Figura 7 - Diagrama causal de sistemas de mercados de energia elétrica [83].	23
Figura 8 - Etapas da metodologia de <i>soft systems</i> [90].	25
Figura 9 - Características das diferentes abordagens de modelização analisadas.	26
Figura 10 - Modelo conceptual proposto.	27
Figura 11 - Operacionalização do Modelo Conceptual	29
Figura 12 - Conceito de edifício e respetivos subconceitos.	30
Figura 13 - Relações diretas entre o conceito de edifício e os restantes conceitos.	31
Figura 14 - Conceito de utilizador e respetivos subconceitos.	32
Figura 15 - Relações diretas entre o conceito de utilizador e os restantes conceitos.	33
Figura 16 - Conceito de dispositivo e respetivos subconceitos.	34
Figura 17 - Relações diretas entre o conceito de dispositivo e os restantes conceitos.	35
Figura 18 - Conceito de contexto e respetivos subconceitos.	35
Figura 19 - Relações diretas entre o conceito de contexto e os restantes conceitos.	36
Figura 20 - Conceito de energia e respetivos subconceitos.	37
Figura 21 - Relações diretas entre o conceito de energia e os restantes conceitos.	37
Figura 22 - Fases do processo de modelização.	38
Figura 23 - Processo de modelização.	40
Figura 24 - Componentes do submodelo.	42
Figura 25 - Enquadramento dos componentes da descrição do submodelo nos conceitos do modelo conceptual.	43
Figura 26 - Exemplo da descrição de um submodelo para análise da influência do contexto climatérico no consumo elétrico de um dispositivo.	43
Figura 27 - Formulação do modelo qualitativo.	45
Figura 28 - Representação do processo de modelização composicional (figura adaptada de [93]).	46
Figura 29 - Aplicação da modelização composicional ao modelo conceptual proposto.	47
Figura 30 - Exemplo de instanciação de um modelo composicional.	48
Figura 31 - Entidades dos fragmentos do modelo de simulação qualitativo para o sistema de arrefecimento.	50
Figura 32 - Cenário do modelo de simulação qualitativo para o sistema de arrefecimento.	51
Figura 33 - Fragmento do modelo para simulação da influência do contexto meteorológico no consumo de energia elétrica em arrefecimento.	52
Figura 34 - Estados (estado 1 e 3) do fragmento de modelo para simulação da influência do contexto meteorológico no consumo de energia elétrica para o sistema de arrefecimento.	53
Figura 35 - Instanciação quantitativa.	54
Figura 36 - Posicionamento do <i>Wemeter</i> no processo de modelização.	56
Figura 37 - Arquitetura do sistema de monitorização de energia elétrica <i>Wemeter</i> .	58
Figura 38 - Utilização do <i>Wemeter</i> para o treino de modelos de simulação de consumo de energia elétrica.	59
Figura 39 - Utilização do <i>Wemeter</i> para o treino de modelos de simulação de produção de energia elétrica.	59
Figura 40 - <i>Dashboard</i> do <i>Wemeter</i> , com indicadores e gráficos sobre o desempenho do edifício em termos de utilização de energia elétrica, água e gás.	60

Figura 41 – Principais funcionalidades do <i>Wemeter</i> .	60
Figura 42 – Visualização da utilização de energia elétrica, água e gás no edifício, desagregada por contadores e tipos de cargas.	61
Figura 43 – Esquema da bomba de calor do edifício Fábrica dos Mirandas.	62
Figura 44 – Instalação da bomba de calor do edifício Fábrica dos Mirandas.	62
Figura 45 - Balanço energético da bomba de calor.	63
Figura 46 - Submodelo da bomba de calor.	64
Figura 47 – Teoria de domínio da instância qualitativa do sistema da bomba de calor.	65
Figura 48 - Influência do contexto temporal no consumo de energia elétrica para a instância qualitativa da bomba de calor.	66
Figura 49 - Influência do contexto meteorológico no consumo de energia elétrica para a instância qualitativa da bomba de calor.	67
Figura 50 - Influência do contexto temporal e meteorológico no consumo de energia elétrica para a instância qualitativa da bomba de calor.	67
Figura 51 - Influência do contexto temporal, meteorológico e geológico no consumo de energia elétrica para a instância qualitativa da bomba de calor.	68
Figura 52 - Entidades dos fragmentos do modelo de simulação qualitativo para a bomba de calor.	69
Figura 53 – Cenário do modelo de simulação qualitativo para a bomba de calor.	70
Figura 54 – Fragmento do modelo para simulação da influência do contexto temporal no consumo de energia elétrica para a bomba de calor.	72
Figura 55 – Estados (estado 1 e 4) do fragmento de modelo para simulação da influência do contexto temporal no consumo de energia elétrica para a bomba de calor.	73
Figura 56 - Fragmento de modelo para simulação da influência do contexto meteorológico no consumo de energia elétrica para a bomba de calor.	74
Figura 57 - Estados (estado 4) do fragmento de modelo para simulação da influência do contexto meteorológico no consumo de energia elétrica para a bomba de calor.	74
Figura 58 - Fragmento de modelo para simulação da influência do contexto geotérmico no consumo de energia elétrica para a bomba de calor.	75
Figura 59 - Estados (estado 1 e 4) do fragmento de modelo para simulação da influência do contexto geotérmico no consumo de energia elétrica para a bomba de calor.	75
Figura 60 - Bloco do submodelo quantitativo para o consumo elétrico da bomba de calor.	76
Figura 61 – Resultados da modelização da influência do contexto temporal no consumo de energia elétrica no período de aquecimento.	77
Figura 62 – Resultados da modelização da influência do contexto temporal no consumo de energia elétrica no período de arrefecimento.	78
Figura 63 – Resultados da modelização da influência do conjunto do contexto meteorológico, temporal e geotérmico no consumo de energia elétrica no período de aquecimento.	78
Figura 64 - Resultados da modelização da influência do conjunto do contexto meteorológico, temporal e geotérmico no consumo de energia elétrica no período de arrefecimento.	79
Figura 65 - Sistema de aproveitamento solar fotovoltaico.	80
Figura 66 – Sistema de monitorização da produção de energia para o sistema de aproveitamento solar fotovoltaico.	81
Figura 67 - Balanço energético do sistema de aproveitamento solar fotovoltaico.	81
Figura 68 - Submodelo do sistema de aproveitamento solar fotovoltaico.	82
Figura 69 - Teoria de domínio da instância qualitativa do sistema de aproveitamento solar fotovoltaico.	83
Figura 70 - Influência do contexto meteorológico na produção de energia elétrica para a instância qualitativa do sistema de aproveitamento solar fotovoltaico.	84
Figura 71 - Influência do contexto temporal na produção de energia elétrica para a instância qualitativa do sistema de aproveitamento solar fotovoltaico.	84
Figura 72 – Entidades da instância qualitativa do sistema de aproveitamento solar fotovoltaico.	85
Figura 73 - Cenário da instância qualitativa do sistema de aproveitamento solar fotovoltaico.	85
Figura 74 - Bloco do submodelo quantitativo formado pelo conjunto do consumo de energia elétrica da bomba de calor e pela produção do sistema de aproveitamento solar fotovoltaico.	87
Figura 75 - Bloco do submodelo quantitativo para a produção elétrica do sistema de aproveitamento solar fotovoltaico.	87
Figura 76 - Resultado da simulação em <i>Matlab</i> com ANN do perfil de produção de energia elétrica em função do contexto temporal.	88

Figura 77 - Resultado da simulação em Matlab com ANN do perfil de produção de energia elétrica. ....	88
Figura 78 - Mapa do <i>campus</i> da Faculdade de Ciências e Tecnologia. ....	90
Figura 79 – Sistema de monitorização da ocupação do edifício do DEE. ....	91
Figura 80 – Sistema de monitorização do consumo de energia do edifício do DEE. ....	91
Figura 81 – Analisadores de energia instalados no QGBT do edifício do DEE. ....	92
Figura 82 - Submodelos do sistema de consumo de energia elétrica do edifício do DEE. ....	92
Figura 83 - Teoria de domínio da instância qualitativa do sistema de consumo elétrico do edifício. ....	93
Figura 84 - Influência do contexto temporal e ocupação do parque de estacionamento na ocupação do edifício para a instância qualitativa de consumo elétrico do edifício do DEE. ....	94
Figura 85 - Influência do contexto temporal e da ocupação do edifício no consumo dos sistemas do edifício e no balanço elétrico do próprio edifício, para a instância qualitativa de consumo elétrico do edifício do DEE. ..	95
Figura 86 – Entidades da instância qualitativa dos sistemas de consumo elétrico do edifício. ....	95
Figura 87 - Cenário da instância qualitativa do consumo elétrico do edifício. ....	96
Figura 88 - Fragmento de modelo para simulação do consumo elétrico do edifício. ....	97
Figura 89 – Estados do fragmento de modelo para simulação do consumo elétrico do edifício. ....	97
Figura 90 - Bloco do submodelo quantitativo para o consumo elétrico do edifício. ....	98
Figura 91 - Blocos do submodelo quantitativo da bomba de calor dividido em submodelos de ocupação do edifício e consumo de energia elétrica. ....	98
Figura 92 - Perfil de ocupação do edifício para 8 semanas. ....	99
Figura 93 - Lotação do parque, ocupação do edifício e pessoas por veículo ao longo de oito semanas. ....	100
Figura 94 - Configuração da ANN utilizada para criar um perfil geral de pessoas por carro. ....	101
Figura 95 - Resultado da simulação em <i>Matlab</i> com ANN do perfil de pessoas por carro. ....	101
Figura 96 - Perfil de ocupação real (a azul) vs previsto (a vermelho). ....	102
Figura 97 - Configuração da ANN utilizada para efetuar a previsão do consumo elétrico do edifício para 9 meses. ...	103
Figura 98 - Resultado do modelo para a previsão do consumo elétrico do edifício. ....	103
Figura 99 - Resultado do modelo para a previsão do consumo elétrico do edifício sem os dados da ocupação para treino. ....	104



## Lista de tabelas

Tabela 1 – Resumo de resultados das várias instâncias quantitativas para o sistema de aproveitamento geotérmico para climatização.....	79
Tabela 2 – Resumo de resultados das várias instâncias quantitativas para o sistema de aproveitamento solar fotovoltaico.....	89
Tabela 3 – Resumo de resultados das várias instâncias quantitativas para o sistema de aproveitamento solar fotovoltaico.....	104
Tabela 4 – Resumo de publicações de artigos científicos. ....	111





## Acrónimos

AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
ANN	<i>Artificial Neural Network</i>
DCV	<i>Demand-Controlled Ventilation</i>
DEE	Departamento de Engenharia Eletrotécnica
EPBD	<i>Energy Performance of Building Directive</i>
GUI	<i>Graphic User Interface</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
MSE	<i>Mean Square Error</i>
NZEB	<i>Net-Zero Energy Building</i>
PMV	<i>Predicted Mean Vote</i>
QAI	Qualidade do Ar Interior
QGBT	Quadro Geral de Baixa Tensão
RFID	<i>Radio-Frequency Identification</i>
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
SED	Síndrome do Edifício Doente
SGE	Sistemas de Gestão de Energia
SSM	<i>Soft Systems Methodology</i>
SD	<i>System Dynamics</i>



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1. Enquadramento e motivação

Os grandes edifícios são responsáveis por uma quota considerável no consumo de energia e emissões globais de CO<sub>2</sub>. De acordo com a *International Energy Agency* (IEA), espera-se que a utilização de energia em edifícios, que em algumas regiões chega a representar 80% da energia total consumida, aumente em 50% até 2050 [1]. Contudo, segundo o *World Business Council for Sustainable Development*, a utilização de energia em edifícios pode ser reduzida em cerca de 60%, até 2050, se forem tomadas medidas imediatas nesse sentido [2]. Vários países já se encontram a trabalhar para este objetivo, através de um reforço na regulamentação de edifícios e em diretivas específicas que garantam que os arquitetos de sistemas operacionais e gestores de instalações se encontram, firmemente, empenhados para uma melhoria do desempenho energético.

A *Energy Performance of Building Directive* (EPBD) estabeleceu, como objetivos europeus a curto prazo, um balanço energético próximo de zero até 2018 para novas construções em edifícios financiados por verbas públicas e até 2020 para edifícios privados.

Na verdade, o desenvolvimento de edifícios inteligentes e dos chamados *Net-Zero Energy Buildings* (NZEBS), que têm como meta alcançar níveis de eficiência energética bastante elevados, pelo aumento da sua eficiência energética (e dos seus ocupantes), recorrendo a fontes de energia renovável (preferencialmente locais) para cobrir as suas necessidades energéticas, estabeleceu uma fasquia, ainda mais alta, no campo da eficiência energética em edifícios [3]. Felizmente, a introdução de sistemas de gestão e controlo automatizado de energia em edifícios tornou-se uma prática mais frequente. Muitos edifícios não residenciais encontram-se já equipados com Sistemas de Gestão de Energia (SGE) que monitorizam e controlam, de uma forma mais ou menos alargada, os vários sistemas envolvidos no consumo de energia.

Contudo, existem algumas limitações quanto à integração de processos de decisão em SGEs, que devem contemplar capacidades de aprendizagem de perfis de utilização e necessidades do edifício, onde se enquadram requisitos energéticos, de conforto e de fiabilidade dos siste-

mas alocados às próprias finalidades do edifício, sejam estas o fornecimento de serviços, o comércio ou a indústria. Estes processos devem adaptar-se, dinamicamente, em função de alterações no ambiente externo e do comportamento dos seus utilizadores, traduzindo-se na otimização do desempenho dos seus sistemas operacionais (por exemplo, os sistemas de climatização e iluminação).

De forma a integrar capacidades de adaptação, nos processos de decisão, é necessário que estes processos sejam suportados por ferramentas que utilizem informação recolhida, dinamicamente, para simular e otimizar alterações no comportamento desses sistemas operacionais, bem como para aferir o seu impacto no desempenho global do edifício. Assim, é importante incorporar modelos de simulação que facilitem a utilização de mecanismos de inferência e decisão, destinados à gestão eficiente de energia, combinando o conhecimento de eventos passados e presentes para antecipar eventos futuros.

Grande parte dos modelos e ferramentas existentes para previsão e apoio à gestão do consumo de energia apresentam, ainda, limitações em termos de integração e correlação de dados, aplicabilidade e contribuição dinâmica para apoio à decisão, quer esta seja autónoma ou não [4][5][6]. Estes modelos e ferramentas são bastante específicos, orientados à simulação de sistemas muito particulares e, normalmente, não estão preparados para uma modelização e simulação contínuas, com integração de informação adquirida dinamicamente, nem para serem integrados com outros modelos de simulação. São frequentemente utilizados em ferramentas orientadas para a fase de projeto de sistemas ou no desenvolvimento de aplicações isoladas para simulação de desempenhos no consumo, produção e comercialização de energia [4].

Torna-se necessário tentar mitigar as limitações enunciadas para melhorar o desenvolvimento e utilização de modelos. Uma abordagem possível é desenvolver novas metodologias de modelização que sejam capazes de integrar e relacionar, dinâmica e, simultaneamente, múltiplos fluxos de energia (incluindo produção, distribuição e consumo), com as entidades que desempenham um papel fundamental no balanço energético do edifício, como sejam as características do próprio edifício, os seus utilizadores, os equipamentos e os sistemas instalados, bem como as condições externas.

## 1.2. Questão de investigação

A questão de investigação a que se responderá com o presente trabalho é a seguinte:

*Será possível desenvolver modelos e ferramentas de modelização, para simulação do balanço energético em edifícios, com escalabilidade ao nível da sua complexidade e abrangência?*

A questão de investigação referida pode ser abordada tendo como orientação a hipótese seguinte:

*Se o balanço energético de um edifício resulta da influência conjunta dos vários sistemas que o constituem, com utilização e especificação de submodelos conceptuais que descrevam esses vários sistemas no contexto da energia então será possível desenvolver modelos e ferramentas de modelização de complexidade e abrangência gradual.*

### 1.3. Contribuições

No presente trabalho é proposto um modelo conceptual que define os conceitos gerais e as respetivas relações, inerentes aos sistemas energéticos, no âmbito do balanço de energia em edifícios. Pretende-se que este modelo conceptual seja suficientemente abrangente e consistente, para identificar e descrever as várias entidades intervenientes no balanço energético dos sistemas enquadrados no contexto dos edifícios, os seus atributos e restrições e, ainda, as relações que possam existir entre elas.

O modelo proposto serve como base à instanciação de submodelos qualitativos e quantitativos para sistemas energéticos. Estas instâncias são os pilares do desenvolvimento de modelos de simulação que estabelecem as pontes entre a aquisição, o processamento de dados e as operações de gestão de energia, para sistemas reais do edifício. Uma abordagem de submodelização facilita o processo de modelização de sistemas que influenciam o balanço energético em edifícios, desagregando cada sistema em diversos subsistemas.

A natureza abrangente do modelo conceptual surge como um aspeto importante, não só na aplicabilidade do modelo a todos os sistemas que influenciem o balanço energético do edifício, mas também na independência do modelo conceptual face à necessidade de ferramentas específicas de modelização.

Com base nas premissas descritas, ao nível de contribuições científicas, propõe-se uma nova abordagem de modelização conceptual, que descreve e integra várias entidades que afetam o balanço energético em edifícios, tendo em consideração a forma como estas se relacionam entre si. Esta abordagem é abrangente, considerando a instanciação qualitativa e quantitativa dos sistemas de energia inerentes ao edifício e respetivos subsistemas. A abordagem proposta promove o desenvolvimento de submodelos e soluções de simulação que se complementam, mutuamente, quando integradas para a modelização de sistemas complexos, e que potenciam a adaptação dinâmica destes modelos de simulação durante o seu ciclo de vida.

Como contribuição técnica destaca-se o desenvolvimento de uma plataforma de aquisição dinâmica de dados, que incorpora capacidades de comunicação e integração com diversos equipamentos e permite monitorizar as várias entidades que compõem a abordagem de modeliza-

ção conceptual proposta. Esta plataforma faz parte integrante da aferição e validação da modelização conceptual proposta, tendo sido utilizada em cenários de teste reais.

## 1.4. Estrutura da tese

No Capítulo 2 é feito um levantamento dos fatores que influenciam, significativamente, o balanço energético em edifícios e cujo conhecimento pode ser utilizado para modelizar tanto o comportamento desses fatores como a produção e consumo de energia do edifício. O Capítulo 2 faz ainda uma análise sobre o desempenho de várias abordagens de modelização e sobre o seu contributo para suportar processos de decisão de SGEs.

No Capítulo 3 é proposto um modelo conceptual que concretiza estes fatores e influências em cinco conceitos interrelacionáveis: utilizador, dispositivo, edifício, contexto e energia. O modelo proposto permite descrever os vários subsistemas que têm influência no sistema do balanço energético em edifícios e suas inter-relações como um todo. O objetivo é potenciar a aplicabilidade de modelos de simulação na gestão dos sistemas dinâmicos de energia em edifícios.

É desenvolvida uma abordagem de submodelização baseada em modelos qualitativos e quantitativos. Os sistemas e subsistemas são modelizados através de submodelos que podem ser organizados em conjuntos para formar modelos mais abrangentes. Esta abordagem tem como objetivo facilitar os processos de modelização. A utilização de modelos qualitativos permite especificar quais as variáveis relevantes para a modelização do sistema, as suas inter-relações e o seu enquadramento no conjunto de conceitos definido no modelo conceptual.

O Capítulo 4 descreve a aplicação prática do modelo conceptual e da abordagem de modelização proposta num conjunto de três cenários reais que pretendem representar vários subsistemas de um único sistema edifício. Neste conjunto estão incluídos um sistema de aproveitamento geotérmico para climatização, um sistema de aproveitamento solar para produção de energia elétrica e o consumo global do edifício. Os vários subsistemas foram descritos, qualitativamente, pelo modelo conceptual e grande parte das relações entre conceitos especificadas e no modelo conceptual, foram validadas experimentalmente. Foi ainda validada a abordagem de submodelização no subsistema do consumo do quadro geral de baixa tensão do edifício, através da integração de dois submodelos (ocupação e consumo) num único modelo.

No Capítulo 5 são abordados os resultados científicos e técnicos alcançados e, ainda, alguns passos que farão sentido serem dados no futuro, no contexto deste trabalho.

## Capítulo 2

# Eficiência energética em edifícios

### 2.1. Balanço energético

Um edifício verdadeiramente eficiente e sustentável está na base do que, convencionalmente, se designa de *Net Zero Energy Building* (NZEB). A definição de NZEB varia bastante e não parece existir, ainda, um consenso quanto a uma definição universal. Alguns autores definem um NZEB através do balanço entre a energia consumida e a energia produzida, enquanto outros consideram as emissões de CO<sub>2</sub>, ou o custo global de energia ou, até mesmo, a origem da principal fonte de energia utilizada [7][8].

Porém, um ponto partilhado por todos é a elevada eficiência energética que os edifícios devem apresentar para atingir a meta NZEB, que não deve prejudicar as condições adequadas ao funcionamento do edifício, nem tão pouco o conforto dos respetivos ocupantes. Os edifícios devem ser construídos de forma eficiente, com materiais e arquitetura adequados, e as suas necessidades energéticas devem ser reduzidas ao essencial, sendo salvaguardadas pela instalação de fontes de energia renovável (preferencialmente locais) [3].

A caracterização do perfil de consumo de energia de um edifício inicia-se no momento da sua conceção. Este perfil é afetado por um conjunto de parâmetros chave, entre outros, a sua construção e estrutura, a sua orientação, a sua localização, o clima, a variação das condições atmosféricas que o rodeiam e, ainda, pela utilização de sistemas por parte dos seus próprios ocupantes. Nos últimos anos, tem-se estudado o impacto destes fatores no consumo de energia do edifício em geral e o potencial da sua utilização para prever e otimizar o perfil de consumo do edifício [9] [3] [10].

De forma a assegurar uma gestão eficiente da utilização de sistemas e recursos disponíveis, a curto e médio prazo, é necessário que esta gestão seja realizada de acordo com as necessidades do edifício, ao nível energético, agora e no futuro. Devem ser utilizadas, também, ferramentas que auxiliem estes processos de decisão. Por um lado, subestimar as necessidades de

energia do edifício pode impedir a tomada de medidas para a redução de consumos energéticos em tempo útil, traduzindo-se em custos de operação desnecessariamente elevados. Por outro lado, sobrestimar as necessidades energéticas pode levar à alocação ineficiente de recursos ou a restrições desnecessárias no consumo. É necessário adotar mecanismos que permitam a modelização de necessidades de consumo. Estes mecanismos têm sido objeto de estudo desde 1966, com a análise da correlação entre o clima de Verão e a utilização de sistemas para controlo de temperatura [11].

Para compreender em pormenor os detalhes do balanço energético de um edifício e a utilização de sistemas de consumo e produção específicos, correlacionando-os com eventos, padrões e comportamentos, é necessário identificar fatores qualitativos e quantitativos e analisar o balanço energético em função destes fatores [12]. Estes devem fornecer informações necessárias e suficientes para caracterizar os modelos de produção e o consumo dos sistemas do edifício.

É importante identificar os principais fatores que influenciam o balanço energético dos edifícios, considerá-los no desenvolvimento de ferramentas que apoiem processos de decisão energeticamente eficientes e fazer uma análise dos processos de decisão existentes e de que forma estes fatores podem melhorar a sua eficácia.

## 2.1.1. Edifício

### 2.1.1.1. Condições estruturais

Um dos fatores fundamentais para a caracterização das necessidades energéticas de um edifício é a sua própria estrutura, que dita desde o momento da sua construção e durante todo o ciclo de vida, quais serão as necessidades mínimas ao nível de iluminação, climatização e ventilação.

Existe, também, uma influência da inércia térmica do edifício no consumo energético, isto é, o tempo de resposta às variações de temperatura exterior. As transferências térmicas entre o ambiente e o edifício podem ocorrer por condução através da estrutura do edifício, como sejam o aquecimento/arrefecimento e as infiltrações de humidade, levando os ocupantes a aumentar a temperatura interior, o que incrementa as perdas por condução [13]. Essas perdas levam à necessidade de maior isolamento. No entanto, Kim & Moon [14] verificaram que os benefícios do isolamento da estrutura do edifício são uma função exponencial inversa, implicando que quanto maior é o nível de isolamento, menor é o ganho que se obtém do mesmo. Apesar disso, consideramos que um dos requisitos principais para se obter bons resultados, das necessidades energéticas em edifícios, é o planeamento correto do isolamento térmico da estrutura do mesmo, permitindo uma poupança energética significativa [13]. Assim, a boa conceção e cons-



trução são os primeiros passos na direção certa para se obter um edifício eficiente ao nível energético [15].

Ao nível de regulamentação, como exemplo, tem-se o caso de Portugal que, através do seu Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), estabelece requisitos de qualidade para os novos edifícios de habitação e para pequenos edifícios de serviços sem sistemas de climatização, nomeadamente, ao nível das características do invólucro, limitando as perdas térmicas e controlando os ganhos solares excessivos [16].

### 2.1.1.2. Conforto

O nível de conforto de um edifício é calculado de acordo com três fatores chave: conforto térmico, conforto visual e Qualidade do Ar Interior (QAI) [17][18][19][20].

Uma parte importante do consumo elétrico, decorrente da utilização regular do edifício, é atribuída à iluminação e aos sistemas de climatização para garantir condições de conforto adequadas aos ocupantes do edifício.

Nos Estados Unidos, estima-se que mais de 40% da energia total consumida por edifícios comerciais se deva à utilização de sistemas de climatização e de iluminação. Estes valores ascendem a 50% em edifícios residenciais [21][22][23].

As estatísticas mostram que os equipamentos de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC) são responsáveis por 68% do consumo total de energia residencial, enquanto os restantes 32% estão relacionados com iluminação e outros aparelhos de uso doméstico [21].

Em relação às emissões de carbono estima-se, também, que a utilização regular destes equipamentos em todo o mundo seja responsável por mais de 50% das emissões de dióxido de carbono [9]. Iluminação, ventilação, aquecimento e refrigeração são as principais áreas onde a otimização do consumo deverá ter mais impacto na economia de energia para o sector da construção.

O conforto térmico relaciona-se, diretamente, com o estado de espírito do ser humano que expressa satisfação de acordo com o ambiente físico circundante. O equilíbrio térmico é afetado por características como ganhos e perdas de calor, podendo gerar sensações de desconforto. O nível de conforto é regulado a partir da utilização adequada de sistemas de climatização. Têm sido realizados alguns estudos com o objetivo de desenvolver modelos de conforto térmico rigorosos, nomeadamente a estimativa baseada em *Predicted Mean Vote* (PMV), proposta por Fanger [20]. Dada a complexidade desta estimativa, foram estudadas algumas alternativas para simplificar a estimativa, em tempo real, do PMV [24].

O conforto visual é influenciado pelo nível de iluminação (medido em *lux*) e pelo brilho solar. A regulação do conforto visual passa tanto pelo controlo da iluminação artificial como pela utiliza-

ção de sistemas de sombra artificial para controlar a radiação solar incidente, a luz natural e o brilho solar [18].

A QAI tem um efeito direto sobre o conforto e produtividade dos ocupantes do edifício. O seu índice é avaliado consoante a concentração de CO<sub>2</sub> no interior do edifício, proveniente da presença de seres humanos, e a partir de algumas outras fontes comuns de poluição do ar. A degradação dos níveis de QAI contribui para um conjunto de doenças causadas ou estimuladas pela poluição do ar em espaços fechados, vulgarmente referido como Síndrome do Edifício Doente (SED) [25]. Manter níveis aceitáveis de QAI é uma questão importante a ter em conta, tanto na fase de projeto do edifício como durante a própria utilização do mesmo. A QAI pode ser melhorada através do controlo dos níveis de ocupação e através do fornecimento de ar fresco para o interior do edifício, utilizando sistemas de ventilação. A utilização destes sistemas tem um impacto direto no conforto térmico e no consumo de energia do edifício. São necessários alguns cuidados para se garantir, simultaneamente, que é feito um controlo eficaz da temperatura interna e ter níveis de QAI aceitáveis. Para isso podem ser utilizados mecanismos de *Demand-Controlled Ventilation* (DCV) [19][26], que permitem reduzir o consumo de energia, salvaguardando níveis mínimos aceitáveis de QAI e, em última instância, otimizando dinamicamente o funcionamento dos sistemas de ventilação em função dos níveis de ocupação, de acordo com a norma ASHRAE [18].

### 2.1.2. Utilizadores

O número de ocupantes que se encontram no edifício, em determinado momento, tem uma influencia bastante importante no consumo do edifício [27]. Existe alguma incerteza, ainda, associada ao número real de presenças e às suas variações pontuais. É muito difícil prever a ocupação para determinados instantes com base em simples expectativas. É necessário que esta monitorização seja em tempo real para estabelecer perfis de ocupação e, com base nesses perfis, fazer melhores previsões [28].

É de referir o impacto que o contexto temporal tem ao nível do número de ocupantes de um edifício. Um exemplo disto é a frequente existência de perfis de ocupação opostos entre as residências e os locais de trabalho. Neste caso o tipo de dia (feriados, dias úteis, fins-de-semana) e a hora do dia têm influência no consumo energético, pelo que o fator “tempo” deve ser considerado em estudos sobre o assunto, como uma variável determinística.

Na Figura 1 estão representados os perfis de ocupação, para dias úteis e fins-de-semana, do edifício de administração da Universidade de Arkansas, obtidos por Davis III & Nutter [29]. É possível verificar que as horas de expediente estão entre as 7 horas e as 18 horas, sendo a ocupação mais elevada nesse período. De igual forma, na Figura 2 estão representados os perfis de ocupação da biblioteca da mesma universidade, obtidos da mesma fonte. Para esse caso, verifica-se que o horário do edifício se prolonga até às 24 horas.

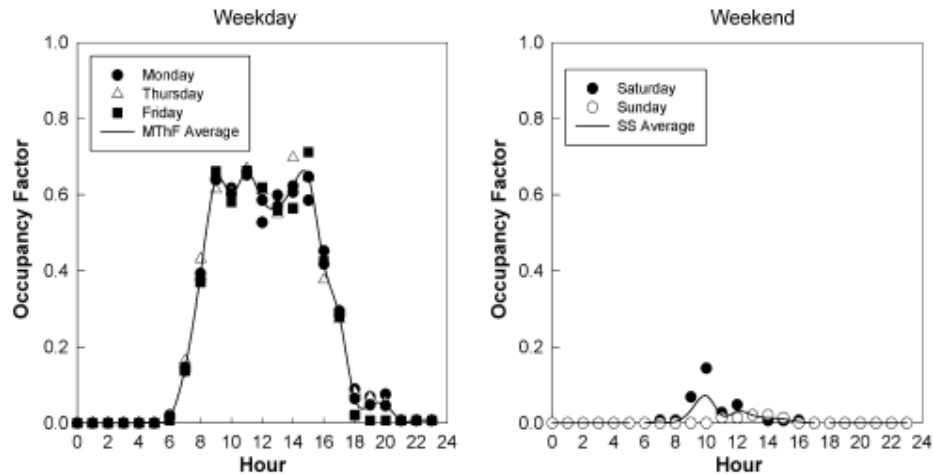


Figura 1 - Perfis de ocupação para dias úteis e fins-de-semana para um edifício administrativo [29].

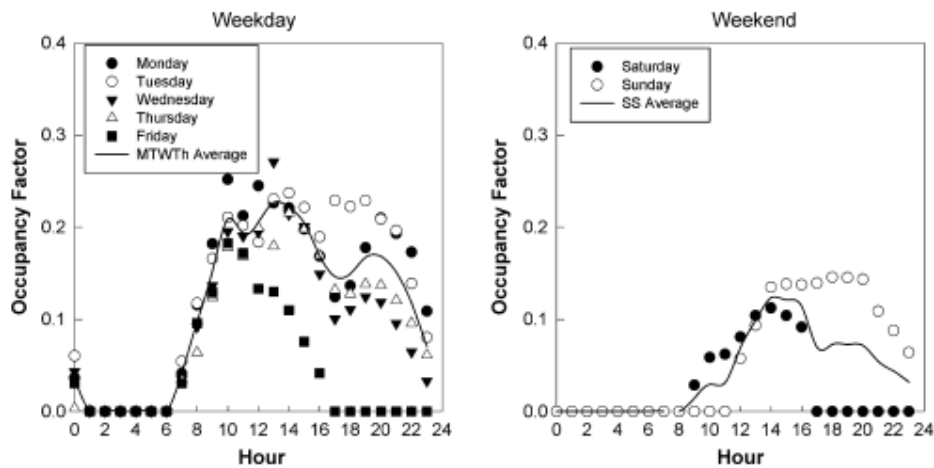


Figura 2 - Perfis de ocupação para dias úteis e fins-de-semana de uma biblioteca [29].

Em alguns casos, em que existe ampla utilização não automatizada de equipamentos e sistemas do edifício, o comportamento dos utilizadores do edifício tem um impacto importante no seu consumo energético, na medida em que é um fator aleatório. A abertura ou fecho de janelas, a regulação de parâmetros de funcionamento do sistema AVAC e os sistemas de iluminação, são alguns dos exemplos de fatores aleatórios causados pela utilização do edifício [30]. Desta forma, a automatização de alguns sistemas do edifício pode gerar reduções de consumo significativas [31].

## 2.1.3. Contexto

### 2.1.3.1. Meteorológico

As características térmicas dos edifícios podem ser influenciadas pelas condições climatéricas a que um edifício se encontra sujeito. Estas afetam o consumo energético do edifício de forma indireta, dado que ditam as necessidades de aquecimento e arrefecimento do edifício, e o consequente consumo energético dos seus subsistemas.

A temperatura e a humidade relativa, medidas através das componentes de *Dry-bulb* e *Wet-bulb temperatures*, servem como referência para o nível de conforto térmico dos ocupantes do edifício [32][33]. Uma variação na temperatura ambiente que torne o edifício desconfortável pode levar ao aumento do consumo energético para compensar esse desconforto. A humidade relativa também está relacionada com a eficiência dos sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC) e, consequentemente, com o consumo energético [34]. A humidade pode ser influenciada, amplamente, por precipitação intensiva [35].

A radiação solar atua como um indicador do calor armazenado nas paredes exteriores de um edifício, devido à incidência dos raios solares [36], e tem uma relevância significativa no consumo de sistemas de AVAC, dada a necessidade de arrefecimento causada pelo aquecimento das paredes exteriores e consequente propagação de calor para o interior do edifício [37]. Os níveis de nebulosidade e claridade do céu são representativos da atenuação da radiação solar durante o dia e das perdas de calor à noite. Li & Lam [38] estudaram os efeitos destes dois fatores no consumo energético de edifícios, referindo as implicações que têm na capacidade necessária dos sistemas de ar condicionado para manter o nível de conforto do edifício.

As condições climatéricas são determinantes, também, na qualidade da luminosidade oferecida aos ocupantes do edifício. Na seleção e conceção de sistemas de luz diurna deve-se ter em consideração as características estruturais do edifício [18][39].

A exposição direta ao sol é, também, um indicador importante, com efeitos diretos na iluminação e na temperatura do edifício. A utilização de persianas externas, controladas automaticamente, podem contribuir, significativamente, para diminuir o consumo global de energia do edifício, como se mostra em [40].

Também a velocidade do vento tem influência na temperatura das paredes e, consequentemente, no funcionamento dos sistemas de climatização [37][41]. A sua influência no consumo energético passa pela capacidade de produção energética de turbinas eólicas, caso existam no edifício e irão alterar as necessidades energéticas do edifício [42].

### 2.1.3.2. Económico

Existem diversos fatores económicos que podem influenciar o consumo energético. O preço da energia (gás, petróleo ou outros combustíveis essenciais à produção de eletricidade) pode ser um fator determinante com as consequentes variações nas despesas do consumo de recursos energéticos nos edifícios.

Apesar da influência do fator custo no consumo de energia dos edifícios ser uma realidade, esta influência não é igual para todos os edifícios. Existem diferenças significativas entre os vários sectores de atividade do ponto de vista do consumidor [43]. Nos sectores de atividade primário e terciário verifica-se que o preço da energia, de uma forma geral, tem um impacto reduzido sobre o consumo. Contudo, ao nível do sector secundário e, especialmente, em áreas onde o consumo energético é bastante elevado, este fator assume uma relevância bastante mais significativa, verificando-se uma evidente redução no consumo com subidas no preço da energia. O impacto é mais evidente no sector residencial, onde se verifica que a subida no preço do gás e energia elétrica implica uma redução significativa nos consumos destes recursos.

Os fatores económicos são, especialmente, importantes para as empresas que operem no sector energético. A previsão de consumos assume aqui um papel chave, sendo que estudos sobre esta realidade no Reino Unido [44] apontam para que um aumento de 1% no erro de previsão implique custos de operação superiores de 10 milhões de libras.

A previsão da produção de energia a partir de fontes renováveis é (e cada vez mais) uma condicionante do custo da energia, pelo que esta se encontra associada à previsão do preço da energia. A antecipação das condições climáticas é, assim, também importante para a redução significativa de custos [45].

### 2.1.4. Sistemas de consumo e de aproveitamento renovável de energia

Recentemente, alguns tipos de sistemas de produção de energia renovável em edifícios têm vindo a receber uma atenção considerável, nomeadamente nos sistemas de energia solar, de energia eólica e de energia geotérmica que podem ser suficientes para cobrir a maior parte do consumo de energia em edifícios [39].

Nos sistemas de aproveitamento de energia solar verifica-se que as características geográficas, tais como as condições climáticas locais, altitude e latitude, têm um efeito determinante no desempenho do sistema. Considerando-se o desenho e a arquitetura do edifício é necessário avaliar alguns fatores para otimizar o desempenho de sistemas fotovoltaicos, tais como, a seleção do sistema, a orientação do edifício, o local e área de instalação, o ângulo de inclinação do painel e a temperatura superficial [39].

Em sistemas de aproveitamento de energia eólica, existem dois fatores chave que influenciam a energia elétrica gerada: a velocidade média do vento; e a sua respetiva direção. Esta última é, relativamente, importante na instalação destes sistemas em edifícios. O comportamento do vento em zonas urbanas consiste num fenómeno complexo. Normalmente, existe pouca energia disponível para os geradores eólicos utilizarem devido ao vento ser caracterizado por elevada turbulência e baixa velocidade nestas zonas. Assim, o desempenho de geradores eólicos em meios urbanos depende bastante da localização geográfica do edifício, do local da instalação do gerador no próprio edifício e, desta forma, da direção do vento [46]. Existem algumas características na conceção e arquitetura do edifício que podem melhorar a concentração do fluxo de ar, entre outras, as extremidades, as arestas e as passagens entre os edifícios [47].

Em sistemas de aproveitamento de energia geotérmica, o uso deste recurso para efeitos de climatização em edifícios encontra-se bem estabelecido e existem já diversos sistemas, nomeadamente bombas de calor, que tiram partido da energia térmica armazenada no subsolo, transferindo calor para o interior ou para o exterior do edifício, consoante se pretenda aquecer ou arrefecer o edifício, respetivamente [48].

Verifica-se que o uso de energia geotérmica para climatização de edifícios tem elevado impacto na redução de consumos do edifício, particularmente no consumo de sistemas AVAC [49]. É bem conhecida a influência das condições geotérmicas na eficiência destes sistemas, dependendo, maioritariamente, da diferença de temperaturas entre a fonte e o dissipador de calor, sendo esta eficiência inversamente proporcional à diferença entre estas temperaturas [50]. O desempenho económico do investimento neste tipo de soluções está intrinsecamente relacionada com a localização geográfica do edifício [51].

Do lado do consumo, de uma forma geral, os sistemas de AVAC e a iluminação são responsáveis pela maior parte do consumo em edifícios [23]. A utilização destes sistemas encontra-se intrinsecamente relacionada com o fornecimento de níveis de conforto adequados aos ocupantes do edifício e dependem das condições climatéricas, dos modos de operação dos sistemas do edifício e do comportamento e horários dos ocupantes. É importante coordenar estes fatores com as necessidades energéticas do edifício de forma a reduzir picos de consumo.

### 2.1.5. Síntese do balanço energético em edifícios

De uma análise feita à literatura, relativamente aos fatores que têm influência no balanço energético do edifício, verifica-se que este é, diretamente e/ou indiretamente, condicionado, fundamentalmente, pelo próprio edifício, pelos diferentes contextos em que está inserido, pelos utilizadores que o frequentam e, por último, pelos equipamentos existentes no mesmo.

Relativamente ao edifício, destacam-se as suas características físicas, as suas características operacionais e as condições de conforto que este proporciona, como fatores que têm relevân-

cia no balanço energético. Estes têm impacto direto na utilização de sistemas presentes no edifício, responsáveis por garantir a sua operacionalidade, assim como as condições necessárias à manutenção do conforto dos ocupantes. Considera-se que os sistemas podem ser analisados consoante a sua função, relativamente a produção, consumo e armazenamento de energia.

Os utilizadores, assim como os seus horários e comportamento, determinam a ocupação do edifício e condicionam a utilização dos sistemas referidos. Estes têm uma relação muito direta com o contexto em que o edifício se enquadra, nas suas vertentes meteorológica, temporal e socioeconómica.

Em termos de balanço energético, este pode ser analisado relativamente a diferentes tipos de energia. A distinção entre energia renovável e não renovável surge como uma distinção importante para efeitos de contabilização do balanço energético.

## 2.2. Modelização energética

Nesta secção é feita uma análise de diferentes abordagens para a modelização do balanço energético de edifícios, desenvolvidas com base em fatores relacionados com o próprio edifício, os seus utilizadores, os equipamentos de produção e consumo de energia, e os diferentes contextos em que o edifício se enquadra.

Em termos de enquadramento em diferentes tipos de contexto, seja o contexto meteorológico ou socioeconómico, existem indicadores que podem ser correlacionados, conjuntamente, para a modelização do consumo elétrico, seja o consumo total do sistema edifício, ou parcelas de consumo de vários subsistemas (por exemplo, sistemas de climatização).

A relevância do contexto socioeconómico e meteorológico é analisado em [52], onde é proposto um modelo de consumo de um edifício residencial, sendo considerados macro-indicadores como a renda, o preço da eletricidade per capita, a média de temperatura e o tempo de luz solar. Como micro-indicador foi considerada a temperatura do ar exterior média, que se correlaciona com o consumo de energia do sistema AVAC edifício.

As condições climáticas também podem ser correlacionadas com a utilização de eletrodomésticos específicos, como visto em [53] onde são analisados os padrões de utilização e o consumo de energia das diferentes categorias de aparelhos, assim como os índices de conforto térmico. Neste caso são combinados perfis de utilização de dispositivos com um contexto meteorológico, um contexto temporal e com o conforto percecionado pelos utilizadores do edi-

fício. É o caso do estudo realizado em [54], onde é analisada a previsão de cargas específicas a curto prazo, a partir da modelização e da utilização de cargas em função de indicadores como a temperatura e a hora do dia, utilizando redes neuronais. Neste estudo é feita a correlação das condições climatéricas, das condições de conforto e dos horários, com variações na utilização de cargas elétricas, a fim de prever picos de carga e médias de carga diárias. Em [55] é estudado um algoritmo para determinar dias da semana com perfis de consumo semelhantes. O algoritmo determina padrões de consumo de energia, tais como consumos e picos de consumo diários, a partir da monitorização de consumos ao longo do tempo, com o objetivo de apoiar a deteção de consumos anormais e estratégias de controlo e supervisão de consumos por recurso a métodos de previsão. Em [56] é analisada a influência das condições climatéricas e das tarifas contratadas pelos consumidores (contexto socioeconómico) na flutuação da procura e da oferta energéticas, de forma a minimizar custos do lado do distribuidor de energia. Para tal foi desenvolvido um modelo conceptual qualitativo com base numa abordagem de *System Dynamics*.

Verifica-se que o contexto geotérmico também tem um impacto no consumo elétrico do edifício, como visto em [57], onde é desenvolvido um modelo 3D com o objetivo de prever desempenhos futuros do reservatório geotérmico. Em [58][48] é analisada a modelização de bombas de calor em contextos geotérmicos, com base em caudais e temperaturas do reservatório. Destes estudos concluiu-se que uma gestão dinâmica do sistema de climatização pode conduzir a melhorias significativas no consumo energético. Em [59] foi desenvolvido um sistema inspirado biologicamente para analisar o comportamento da temperatura do subsolo onde se encontra instalado um permutador de calor. Para modelizar este comportamento não linear foi desenvolvido um modelo baseado na combinação de técnicas de regressão inteligente, a partir de redes neuronais artificiais. Dos estudos referidos, verifica-se que existem vários indicadores ao nível de contexto, que podem ser correlacionados com o consumo de energia do edifício e, desta forma, utilizados na formulação de modelos para este efeito.

O comportamento dos ocupantes do edifício tem uma influência muito particular sobre o consumo de energia. Existem vários estudos e metodologias para a modelização do impacto da ocupação no consumo total de energia dos edifícios. Em [60] foi realizado um estudo sobre o consumo de energia e sobre a sua relação com os respetivos ocupantes de edifícios (seus comportamentos e padrões de atividade). Neste estudo, através da realização de uma correlação entre os padrões de ocupação e os horários de funcionamento dos aparelhos elétricos específicos, foi possível identificar que a ocupação influencia o consumo de energia de forma significativa, mas que esta influência varia consoante o contexto climatérico em que o edifício se encontra. Em [61] são estudados os fatores relacionados com o comportamento dos ocupantes e com o próprio edifício, que afetam o consumo de energia anual, como a climatização e o índice de conforto PMV. Através de uma análise de sensibilidade concluiu-se que a atividade metabólica e o vestuário dos ocupantes têm influência no índice de conforto PMV. Em [62] é



adotada uma abordagem inversa cujo objetivo é modelizar a ocupação do edifício com base em perfis de consumo do edifício e em indicadores que influenciem estes perfis de consumo, tais como, as condições climáticas, as características do edifício e a utilização de equipamentos do edifício. Ao encontrar e estudar padrões de ocupação relacionados com estes indicadores e agrupando edifícios com características estruturais e operacionais semelhantes, os autores são capazes de analisar o comportamento dos ocupantes pelo processo de eliminação dos demais indicadores.

A capacidade de armazenamento térmico dos materiais utilizados na construção do edifício é um fator determinante para as necessidades energéticas do edifício ao nível do conforto térmico. Neste sentido, em [63] foram estudados os efeitos do aumento da capacidade de armazenamento térmico destes materiais. Para tal, foi desenvolvido um modelo em *Matlab* para relacionar o consumo energético de um edifício em função de variáveis como energia térmica incidente, temperatura exterior, capacidade e condutividade térmicas. O estudo demonstrou que estas variáveis de entrada podem alterar de forma significativa o perfil de consumo elétrico.

## 2.3. Apoio à decisão para gestão de energia

O processo de apoio à decisão na gestão do balanço energético em edifícios envolve a avaliação de ações predefinidas ou estratégias direcionadas para objetivos estabelecidos neste âmbito. Existem duas dificuldades principais para o desenvolvimento de processos de apoio à decisão eficiente, nomeadamente [64]:

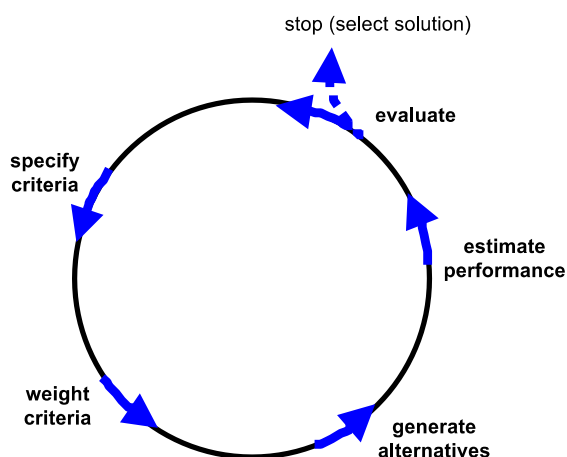
- Os objetivos definidos para a otimização do funcionamento do edifício são geralmente mais do que um e conflituam. Um exemplo é o frequente *trade-off* entre a manutenção de níveis aceitáveis de conforto e a redução do consumo de energia;
- As ações de otimização dependem de diversas variáveis de decisão (entre outras, os consumos de energia, a temperatura, a ocupação do edifício, a QAI e a luminosidade) que não podem ser negligenciadas e que, frequentemente, não são monitorizadas ou integradas dinamicamente nos processos de decisão.

Neste sentido, o processo de apoio à decisão deve consistir num processo iterativo, influenciado pelos objetivos definidos (critérios), alternativas, estratégias, ações e, por último, pelo próprio gestor que seleciona a solução, conforme ilustrado na Figura 3.

Os processos de apoio à decisão podem seguir diferentes abordagens que se distinguem quanto à sua aplicabilidade, dividindo-se em abordagens *offline* e *online*. As abordagens *offline* visam identificar medidas específicas, relacionadas com a construção do edifício, que possam contribuir para uma melhoria no desempenho dos edifícios em termos de redução do consumo de energia. Consistem na utilização de ferramentas de simulação, onde são desenvolvidos modelos virtuais do edifício e são, normalmente, aplicadas durante a fase de projeto ou cons-

trução, ou para fins de adaptações de instalações estruturais do edifício de uma forma muito pontual. Estas ferramentas permitem melhorar o desempenho do edifício ao nível energético ao longo de um processo iterativo que consiste na recomendação de ações específicas ao nível da própria estrutura do edifício. Atualmente, existem vários programas de simulação que suportam esta abordagem, como o TRNSYS [65][66], DOE 2 [67][68], EnergyPlus [69][70][71], entre outros.

As abordagens *online*, por outro lado, concentram-se em identificar parâmetros específicos, tais como valores de funcionamento e estratégias de controlo, utilizando medições, em tempo real, adquiridas a partir de SGEs que otimizem o desempenho energético do edifício durante a operação do mesmo, de forma dinâmica e autónoma. Frequentemente estas abordagens consistem na otimização dinâmica de sistemas do edifício utilizando algoritmos de multiobjectivo para apoio à decisão. É o caso da abordagem proposta em [72] para apoiar a otimização dinâmica do sistema de climatização de um edifício. Neste caso foram considerados como objetivos o conforto térmico, a concentração de CO<sub>2</sub> e o consumo de energia. Utilizando a abordagem proposta foi possível alcançar os pontos ótimos de funcionamento do sistema de climatização, maximizando, simultaneamente, os objetivos considerados.



**Figura 3 - Processo de apoio à decisão [64].**

Recentemente, o tópico do suporte à decisão para a gestão de energia tem sido abordado em alguns projetos de investigação e desenvolvimento. É necessário que as decisões neste contexto sejam tomadas de forma dinâmica para a utilização adequada dos subsistemas do edifício, tendo em conta as previsões de condições meteorológicas e os comportamentos imprevisíveis dos utilizadores do edifício. Em [73], verificou-se que podem ser propostas metodologias para controlo assistido por modelos, com o objetivo de melhorar o desempenho energético de edifícios, através de uma adaptação dinâmica e automática de parâmetros relevantes para o sistema de controlo. Neste caso foram considerados, principalmente, modelos de simulação

térmica, sensores, atuadores, interfaces de utilizador e ferramentas de controlo e otimização genéricas. Em [74] o objetivo é melhorar a eficiência energética em edifícios e em blocos de edifícios, aumentando a consciencialização energética nos utilizadores e coordenar o consumo com a produção de energia renovável. É abordada a integração de fontes de energia renováveis e a sua utilização otimizada, através de recurso a modelos de simulação sobre balanços energéticos de edifícios [75]. Em ambos os casos, é tida como base a utilização de modelos para suportar a tomada de decisões de forma dinâmica.



## Capítulo 3

# Modelização conceptual de edifícios como sistemas de energia

### 3.1. Conceitos fundamentais

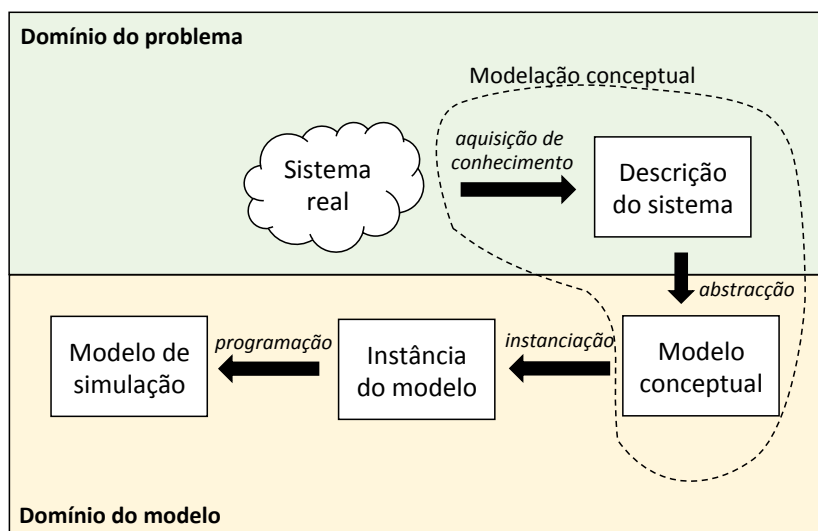
A modelização conceptual consiste no processo de abstracção de um modelo de simulação a partir de um sistema real que se pretende modelizar. Por outras palavras, consiste na selecção do que deve ser modelizado e do que não deve ser modelizado [76].

Todos os modelos de sistemas são simplificações do mundo real, pelo que todos os modelos para simulação envolvem modelização conceptual a algum nível de complexidade. Mesmo o modelo de simulação mais completo e complexo faz suposições sobre o mundo real. A base para uma boa modelização conceptual consiste na selecção e uso de um nível de simplificação adequado.

A Figura 4, que tem como base as considerações descritas em [76], representa o processo de abstracção que está na base da formulação de um modelo conceptual. Este processo passa por concretizar as características relevantes de um determinado sistema real (problema) que se pretende representar, através da aquisição de conhecimento desse mesmo sistema. Este modelo conceptual é instanciável para particularizações do problema, isto é, para descrever sistemas concretos com base nos aspetos gerais definidos pelo modelo conceptual. Estas instâncias podem ser traduzidas em modelos de simulação computacionais.

Mais formalmente podemos definir um modelo conceptual como um conjunto de conceitos, com proposições que os descrevem, que expressam as relações entre eles, ou que estabelecem as premissas que formam a base do modelo. Tanto os conceitos como as proposições do modelo são abstratos e genéricos [77].

A modelização conceptual é uma ferramenta de análise aplicável ao nível físico, funcional e de desempenho, sobre um determinado problema ou sistema, seja em componentes elementares, nas suas funcionalidades e propriedades, módulos agregados, subsistemas, ou mesmo num sistema físico como um todo, no seu contexto operacional [78]. Está na base da formulação de modelos matemáticos, do entendimento quantificado, da formulação de hipóteses e, por último, de suposições quando não existem dados disponíveis para validação. Assenta na utilização de diferentes ferramentas visuais, como forma de auxílio à compreensão e à modelização dos vários níveis de abstracção, começando pelo mais simples e expandindo-se gradualmente por soluções mais complexas, com base no aumento da percepção do utilizador sobre a realidade.



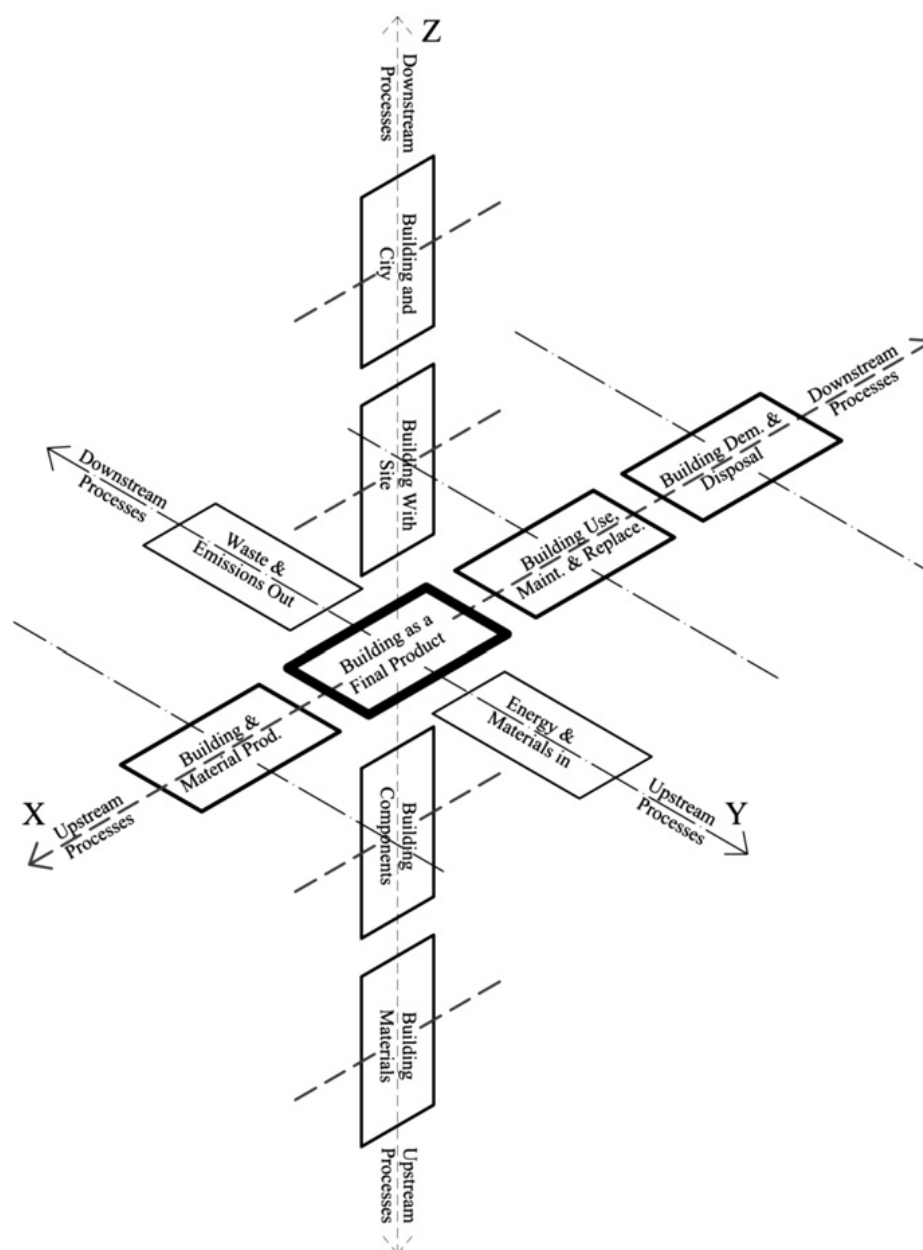
**Figura 4 - Modelização conceptual**

Em última instância, o objetivo do modelo conceptual é chegar a um modelo apto para a finalidade. Assim, a conceção do modelo deve garantir que este produz resultados adequados para o efeito, que é acreditado pelos utilizadores (credibilidade), que é viável de desenvolver dentro das limitações dos dados disponíveis e que é útil.

### 3.2. Modelização de sistemas energéticos

Partindo das bases da modelização conceptual enunciadas anteriormente, torna-se fundamental definir qual o sistema a modelizar, quais os objetivos para o modelo conceptual e, em última instância, como é feita a modelização conceptual.

Neste campo, o modelo conceptual pode ser definido como uma base para a instanciação qualitativa e/ou quantitativa, utilizando ferramentas visuais para representação das entidades e respetivas relações do modelo. A título de exemplo, veja-se o modelo conceptual instanciável proposto por Manish para a definição de condições fronteiras em sistemas [79] (Figura 5).

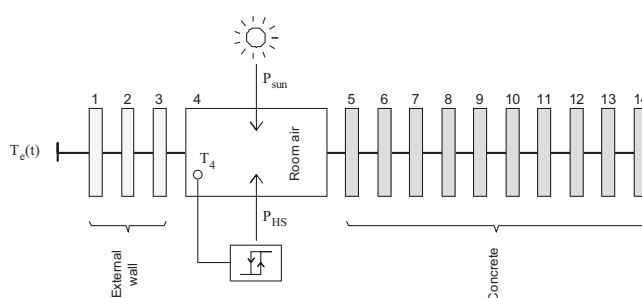


**Figura 5 - Esquema tridimensional das fronteiras do sistema para cálculo de energia interna [79].**

O objetivo do modelo é representar, de forma clara e abrangente, as contribuições científicas existentes referentes à caracterização de condições fronteira em sistemas. O método proposto utiliza diversos diagramas relacionais, onde são definidos, claramente, diversos conceitos, a relação entre eles e as fronteiras entre cada um. O modelo é instanciável, permitindo o desenvolvimento de modelos qualitativos e quantitativos para sistemas específicos. Esta base possibilita o desenvolvimento de métodos de cálculo apropriados que incluam uma definição extensa de condições fronteira e auxilia na quantificação da energia contida no edifício. O modelo apre-

sentado simplifica vários processos inter-relacionados utilizando um sistema tridimensional para estruturação e categorização e integra grande parte dos aspetos mais importantes do ciclo de vida energético.

Karlsson propõe um modelo conceptual para investigar o impacto resultante do aumento da capacidade de armazenamento térmico dos materiais de construção de edifícios [80]. O objetivo é investigar o impacto da massa térmica em climas de temperaturas médias baixas, onde o edifício é aquecido durante a maior parte do ano e onde existem grandes perdas de calor por condução térmica. É apresentado um modelo muito simples que pode ser usado para investigar a influência das propriedades térmicas dos materiais na utilização de energia, nas necessidades energéticas e no conforto.



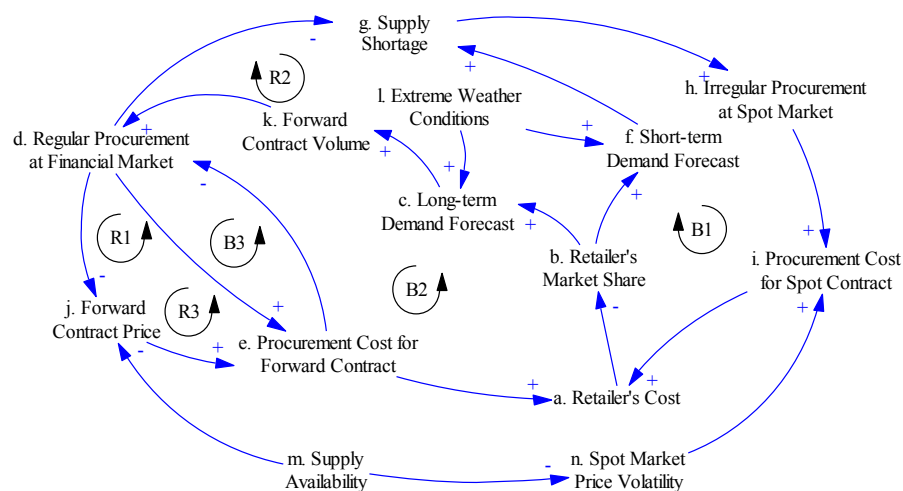
**Figura 6 - Modelo térmico numérico [80].**

O modelo tem como elementos fundamentais os conceitos de parede externa, parede interna e ar interior. O modelo conceptual proposto serve de base à instanciação de modelos quantitativos específicos e ao desenvolvimento de modelos de simulação que permitem analisar a importância das propriedades térmicas dos materiais em grandes edifícios. Contudo, ambas as abordagens propostas por Manish e Karlsson são demasiado focadas no estudo onde são aplicadas, não existindo um método ou estrutura definidos para aplicação da metodologia a outros sistemas.

Algumas abordagens de modelização utilizam a metodologia proposta por Forrester, designada por *System Dynamics* (SD) [81]. Esta metodologia, bastante mais estruturada que as anteriores, considera que todos os aspetos do mundo real estão interligados por padrões complexos, que o mundo é composto por fluxos de informação intrinsecamente diferentes de fluxos ao nível físico, que existem não-linearidades e que estas devem ser consideradas elementos importantes na modelização de sistemas. Forrester considera que é possível capturar a complexidade do mundo real em modelos, sem perda de relevância. Para isso são desenvolvidos modelos que identificam, por meio de simulação experimental, as alavancas adequadas para eliminar comportamentos no sistema, considerados indesejáveis. Um dos pressupostos do campo é que qualquer estudo SD deve ter um propósito, um comportamento, um problema, uma questão ou um sistema indesejável definido que deve ser corrigido [82]. Veja-se, como exemplo, a



abordagem proposta por Rasjidin, para a modelização conceptual de sistemas de mercados de energia [83]. O propósito é auxiliar os distribuidores de energia elétrica na otimização de processos de gestão de contratos de fornecimento de energia num mercado financeiro Australiano dinâmico, reduzindo custos. Dadas as características dinâmicas dos sistemas de mercados de energia, o processo de modelização conceptual assenta numa abordagem de SD. O objetivo é desenvolver um modelo conceptual para avaliar os efeitos dos volumes de energia contratados e condições meteorológicas nos custos para os distribuidores de energia. A modelização inicia-se com a observação dos sistemas considerados e com a identificação dos objetivos do modelo, passando pela caracterização de um sistema simplificado e bem definido através da seleção adequada das entidades e variáveis relevantes para os objetivos do modelo. Finalmente, esta informação é instanciada, qualitativamente, em diagramas causais e de fluxo. Na Figura 7 observa-se um destes diagramas, onde está representado o sistema de oferta e procura de eletricidade. As interações entre as diferentes variáveis do diagrama são representadas por setas e sinais, para ilustrar direção e efeito. Um sinal positivo indica que ambas as variáveis evoluem da mesma forma quantitativa. Como exemplo, observa-se a interação positiva entre a variável *b* (*Retailer's Market Share*) e a variável *c* (*Long-term Demand Forecast*), o que indica que um incremento na cota do mercado retalhista leva a um incremento da previsão de procura a longo termo. Adicionalmente, duas ou mais variáveis podem formar um ciclo, representado por uma seta circular.



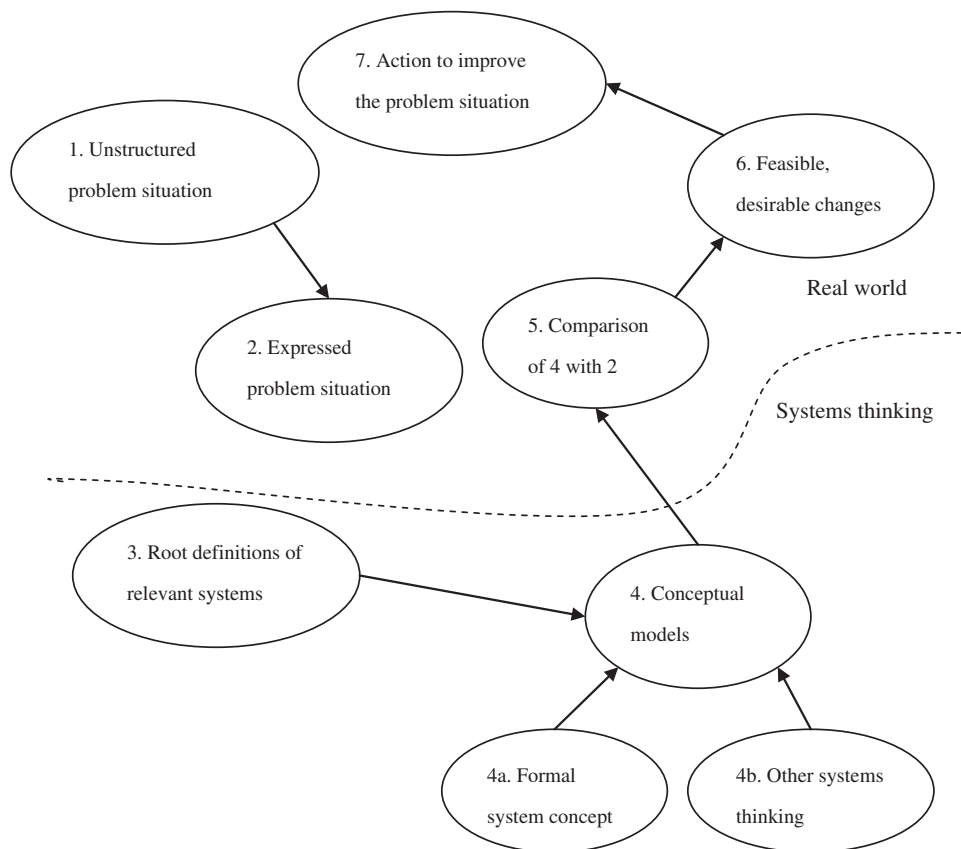
**Figura 7 - Diagrama causal de sistemas de mercados de energia elétrica [83].**

Noutros exemplos observa-se a aplicação da abordagem de SD à modelização de análise comportamental na indústria química [84], a mercados de energia fotovoltaica [85] e a gestão financeira sustentável em redes de água municipal [86]. Uma das limitações mais relevantes da metodologia de SD é o facto de se assumir a existência de um problema que necessita de solução. A existência deste tipo de foco limita o entendimento da realidade que se pretende mo-

delizar, não procedendo à análise da realidade de uma forma abrangente [82]. Outra limitação é não existir referência a metodologias de instanciação qualitativa ou quantitativa dos modelos baseados em SD.

Outras abordagens de modelização conceptual utilizam a metodologia de *soft systems* (SSM) para caracterizar modelos conceptuais que envolvam, maioritariamente, contextos sociais e ambiente organizacional [87]. A metodologia não se foca no estudo objetivo de problemas e na busca de soluções ótimas. Pelo contrário, pretende, como metodologia, explorar, questionar e aprender sobre problemas. Os modelos construídos com base em SSM não tentam descrever o mundo real nem são destinados a ser utilizados como modelos normativos. Os modelos são vistos como uma fonte de perguntas a fazer sobre a situação-problema, criando um debate estruturado sobre possíveis mudanças. O resultado esperado de um modelo baseado em SSM consiste num conjunto de ideias e mudanças (não necessariamente consensuais) sobre a situação-problema [82]. Esta metodologia assenta nas etapas representadas na Figura 8, nomeadamente: 1) inicialmente o problema é compreendido através da recolha de toda a informação e relações relevantes sobre as diversas entidades que fazem parte da situação-problema; 2) a situação-problema é visualmente representada através de esquemas (como por exemplo, mapas mentais ou diagramas relacionais, entre outros); 3) descreve-se, de forma concisa, as bases do sistema de atividades humanas que compõem a situação-problema (*root definitions*), utilizando determinados elementos especificados pela SSM; 4) é formalizado o modelo conceptual para a situação-problema em questão; finalmente, em 5), 6) e 7) o modelo é validado, adaptado e utilizado para obter melhorias na situação-problema para a qual foi desenvolvido.

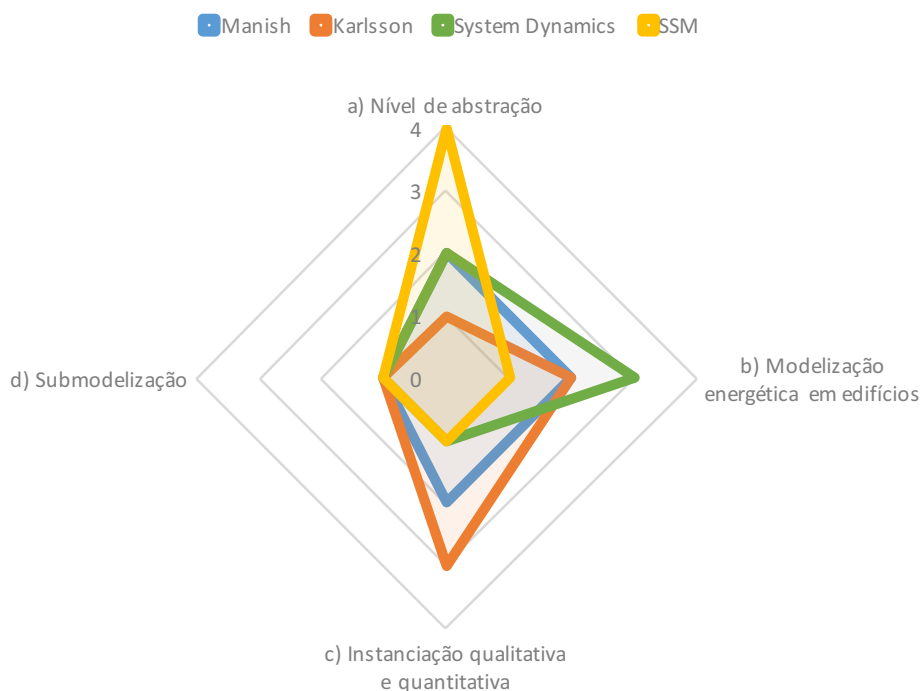
Como exemplo considere-se o modelo conceptual, proposto por Ngai, para identificação de oportunidades na gestão de energia, entre outros recursos (água e gás), e em processos de fabrico têxtil [88]. O seu objetivo é simplificar o desenvolvimento de sistemas de suporte à gestão destes recursos. São adquiridos os requisitos em termos de contexto e é desenvolvido um modelo conceptual através da metodologia de *soft systems*. A metodologia usada permite uma caracterização estruturada de sistemas reais essenciais ao desenvolvimento de aplicações para gestão de *utilities*. O modelo conceptual desenvolvido fornece uma visão clara sobre como as várias atividades humanas se relacionam no contexto da gestão de *utilities* em processos de fabrico têxtil. Em [89] os autores propõem um modelo conceptual complexo, baseado em *soft systems*, para explorar o impacto de tecnologias existentes em *smart cities* nas mudanças de comportamento dos cidadãos em termos de consumo de energia residencial. O modelo representa os principais atores (empresas de *utilities*, entidades governamentais e urbanas, grupos de sustentabilidade e os próprios cidadãos), regulamentos, variáveis de decisão e variáveis comportamentais e métricas de *performance* no processo de mudança comportamental nos consumos energéticos residenciais. O modelo representa o processo das mudanças comportamentais a nível energético, num contexto sociocultural e tecnológico, e permite verificar se determinadas suposições são verdadeiras, se integradas num modelo do sistema.



**Figura 8 – Etapas da metodologia de *soft systems* [90].**

As várias abordagens de modelização conceptual referidas podem ser analisadas relativamente aos objetivos esperados para esta tese, nomeadamente: a) nível de abstração do sistema a modelizar; b) foco na modelização energética em edifícios; c) aptidão para instanciação qualitativa e quantitativa; e d) abordagem de submodelização. Estas características foram quantificadas de um a quatro na Figura 9, para cada abordagem de modelização. Foram tidas em conta as premissas base especificadas na literatura e casos de aplicação prática sobre cada abordagem de modelização.

Relativamente à capacidade de abstração, observa-se que a SSM é a que mais se destaca. No entanto, a natureza da SSM limita a aplicação da abordagem em modelos de sistemas energéticos, e em particular para a modelização energética em edifícios, dado que o resultado da aplicação desta abordagem não se concretiza em algo objetivo e concreto. A SSM também não prevê a instanciação qualitativa ou quantitativa de modelos. Neste campo é a abordagem proposta por Karlsson que se destaca, demonstrando instanciação qualitativa e quantitativa. No entanto não é especificado um método genérico para estas instanciações, aplicável a outros modelos. Verificou-se que todas as abordagens de modelização tinham alguma aplicabilidade à modelização de energia em edifícios, à exceção da SSM.



**Figura 9 – Características das diferentes abordagens de modelização analisadas.**

De uma forma geral, verifica-se que as abordagens analisadas apresentam limitações. Desta forma, optou-se por propor uma abordagem de modelização original, tendo em consideração alguns aspetos importantes decorrentes das abordagens de SSM e SD. Foram tidas em conta bases do processo de modelização conceptual da SSM e, ao nível da representação de elementos e relações entre elementos do modelo, adotou-se uma abordagem semelhante ao da metodologia de SD, com base em setas e sinais.

### 3.3. Especificação do modelo conceptual

#### 3.3.1. Aspetos gerais e operacionalização do modelo conceptual

Pretende-se desenvolver um modelo conceptual como base comum que permita descrever, completamente, os vários subsistemas que têm influência no sistema do balanço energético em edifícios, de forma estruturada e genérica. O balanço energético engloba todos os intervenientes que têm efeito físico no edifício ao nível energético, assim como as suas ações e inter-relações. O objetivo é potenciar a aplicabilidade de modelos de simulação na gestão de energia em edifícios.

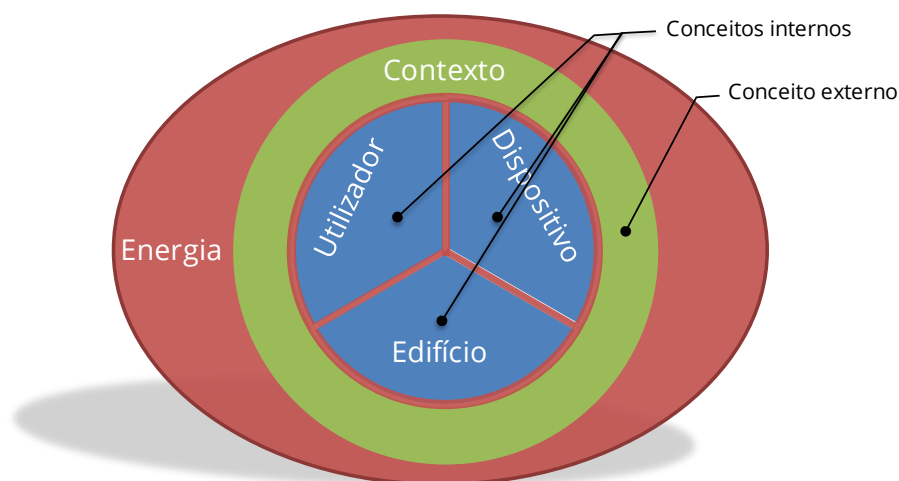
Na Secção 2.1, estão presentes conceitos que permitem categorizar estes subsistemas consoante a sua natureza e o papel que desempenham no sistema do balanço energético, sendo

que os conceitos de edifício, dispositivo e utilizador podem ser considerados conceitos macro, que dizem respeito a fatores internos do balanço energético do edifício. O conceito de edifício engloba o conjunto de atributos físicos da instalação que se pretende modelizar, isto é, todas as características construtivas, estruturais e geográficas da instalação. O conceito de utilizador integra toda a informação referente a horários, perfis comportamentais e ocupacionais. No conceito de dispositivo estão considerados todos os equipamentos do edifício, utilizados para garantir a sua operacionalidade, que são responsáveis pela produção e consumo de energia.

Dada a existência de fatores externos ao edifício que têm impacto no balanço energético do edifício, é considerado o conceito de contexto, onde se integram as condições climáticas e meteorológicas, temporais, geotérmicas e socioeconómicas em que se enquadra o edifício.

Finalmente, importa considerar a energia como um conceito que caracteriza o balanço energético dos subsistemas do edifício. Neste conceito faz sentido analisar o balanço energético como uma composição de balanços dos vários tipos de energia (entre outras, térmica, elétrica e química). Estes conceitos podem ser analisados em maior pormenor em [91].

Como está representado na Figura 10, os diferentes conceitos estão diretamente relacionados entre si. Estas relações estão representadas pelas fronteiras entre os vários blocos de conceitos. Os conceitos de utilizador, de dispositivo e de edifício são considerados conceitos internos por representarem subsistemas interiores ao sistema do balanço energético do edifício. Já o conceito de contexto é considerado um conceito externo. Apesar de se relacionar diretamente com os conceitos internos, o conceito de contexto inclui todos os subsistemas exteriores ao sistema do balanço energético do edifício e que têm impacto nos subsistemas dos conceitos internos.



**Figura 10 - Modelo conceitual proposto.**

O conceito de energia é considerado transversal tanto aos conceitos internos de utilizador, dispositivo e edifício, como ao conceito externo de contexto. É um conceito que constitui o resultado ao nível energético dos vários subsistemas.

Ao nível da informação que é descrita por cada conceito, estes distinguem-se quanto à sua frequência de atualização. Considera-se que os conceitos internos incluem informação considerada estática, ou seja, que é atualizada esporadicamente ao longo do ciclo de vida do balanço energético do edifício. Tomando como exemplo o conceito de edifício, no que diz respeito às suas características construtivas, estas sofrem mudanças relevantes isoladas e com intervalos de tempo consideráveis. Já ao nível de informação que é atualizada dinamicamente, esta é considerada tanto no conceito externo de contexto como nos conceitos internos (como por exemplo, a ocupação do conceito edifício). Temos como exemplo a informação referente às condições climáticas, onde as variações têm intervalos de tempo muito mais curtos. Também a energia é um conceito considerado dinâmico visto que diz respeito ao balanço energético do edifício e este encontra-se sobre constante mudança.

Os conceitos do modelo conceptual e as suas inter-relações são descritas em maior pormenor na subsecção 3.3.2.

A operacionalização do modelo conceptual inicia-se com a aplicação destes conceitos, e respectivas relações, a sistemas e/ou subsistemas específicos, que tenham influência no balanço energético do edifício. O objetivo é representar/modelizar sistemas/subsistemas de forma estruturada e enquadrada nos conceitos do modelo conceptual especificados.

Como representado na Figura 11, estes conceitos e relações são instanciadas em submodelos que modelizam, parcialmente ou na totalidade, sistemas/subsistemas específicos. Cada subsistema pode ser modelizado através de um ou mais submodelos. Estes submodelos podem ser agregados para modelizar sistemas/subsistemas mais abrangentes e/ou complexos. Finalmente, a conjugação de submodelos é utilizada em modelos ou ferramentas de simulação. Na Secção 3.4 é detalhado o processo de instanciação do Modelo Conceptual.

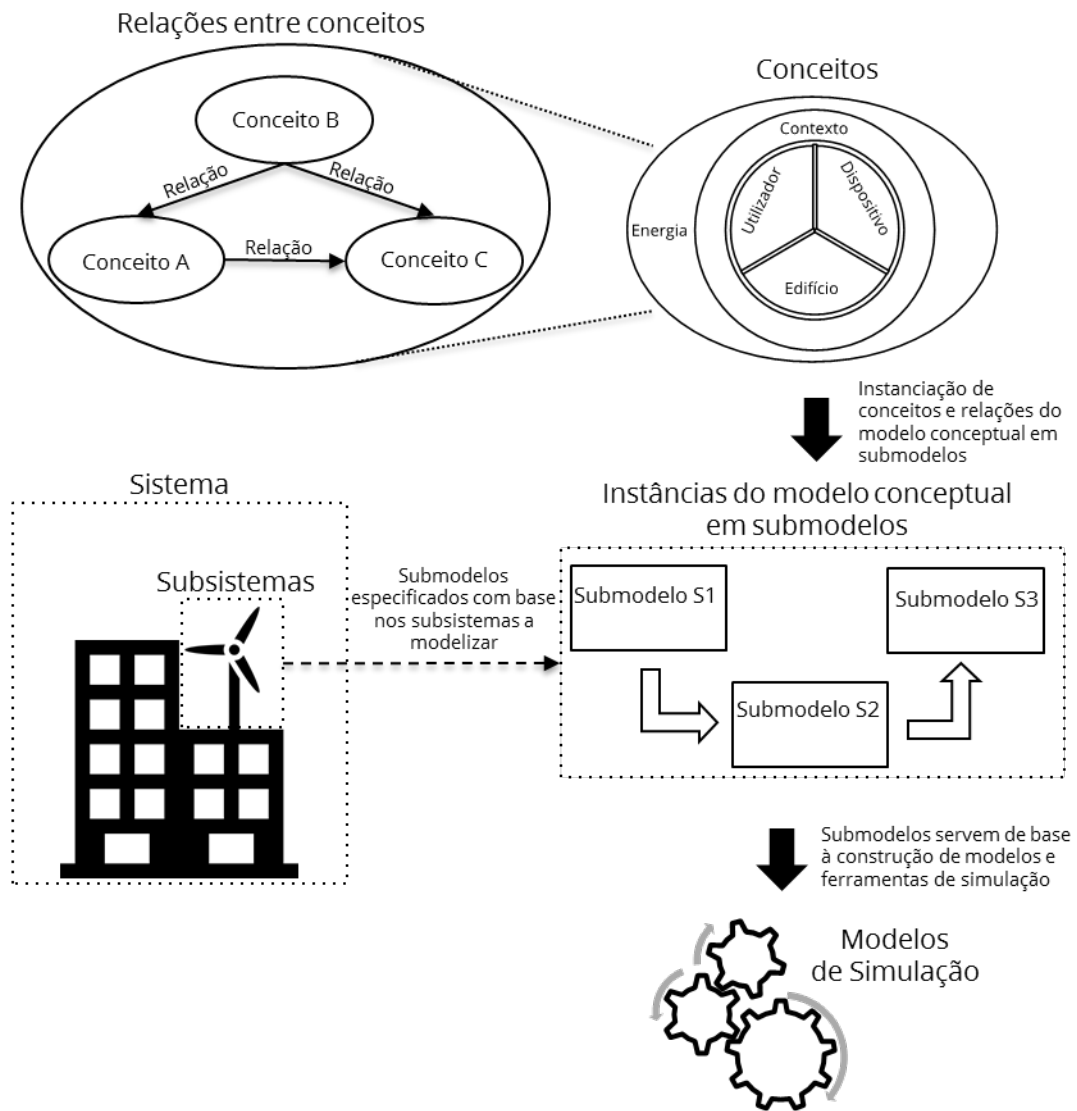


Figura 11 - Operacionalização do Modelo Conceptual

### 3.3.2. Conceitos do modelo

Nesta secção é feita a descrição dos vários conceitos do modelo conceptual. O conceito assume uma estrutura hierárquica de áreas de interesse distintas e complementares denominadas subconceitos. Cada conceito categoriza um conjunto abrangente de subconceitos. Estes podem ser categorizados como subconceitos dentro do próprio conceito ou subconceito a que pertencem.

### 3.3.2.1. Edifício

Para o conceito de edifício foram considerados como subconceitos as características físicas, as características operacionais e o conforto, este último nas suas componentes de conforto térmico, conforto visual e qualidade do ar interior (QAI) (Figura 12).



**Figura 12 - Conceito de edifício e respetivos subconceitos.**

As características físicas do edifício têm um papel fundamental no impacto do seu próprio balanço energético. Estas características definem, à partida, a capacidade de o edifício perder ou ganhar energia para o ambiente envolvente, sob a forma de calor. São importantes os fatores ao nível do projeto e da construção, os materiais e as técnicas utilizadas, bem como a própria localização e a orientação do edifício. As características operacionais do edifício relacionadas com os requisitos energéticos do seu sector de atividade, ditam o perfil de consumo de energia do edifício a partir da utilização de equipamentos específicos instalados no edifício. Como as características físicas e operacionais, ao longo do ciclo de vida do edifício, se mantêm, praticamente, inalteradas, estes subconceitos são considerados estáticos.

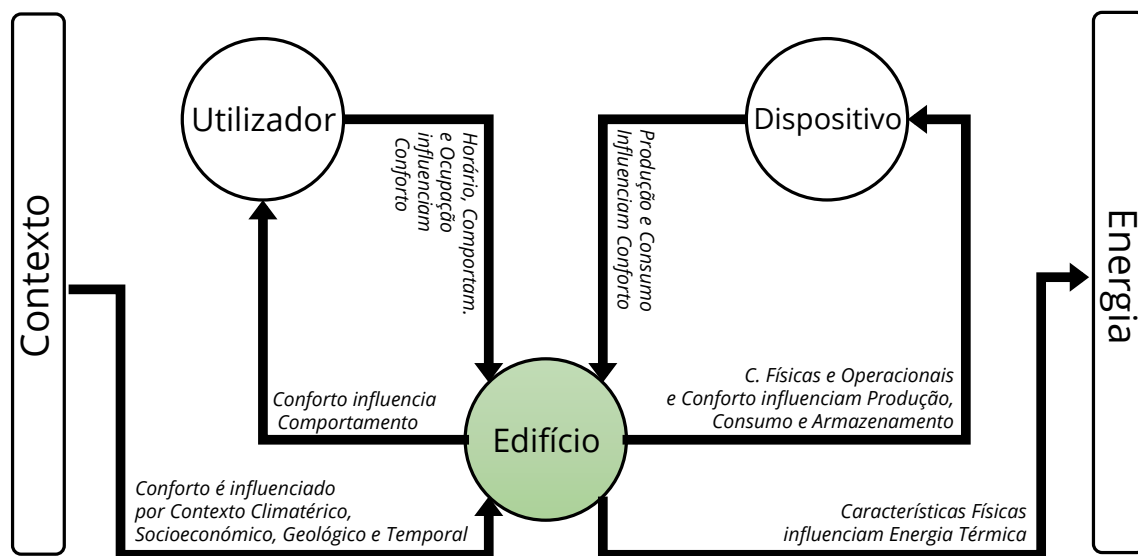
No conceito de edifício surge também o conforto, dividido em conforto térmico, visual e QAI, que tem um impacto indireto nos consumos de energia do edifício. É o conforto, percecionado pelos utilizadores que define os requisitos energéticos do edifício, a partir da utilização de dispositivos instalados para manipulação de temperatura e humidade, fluxo de ar e iluminação. Os requisitos de conforto térmico influenciam a utilização de equipamentos que, numa primeira instância, ditam a energia térmica do edifício percecionada pelos seus utilizadores, aquecendo ou arrefecendo o ambiente interior e, desta forma, atuando como produtores ou consumidores de energia térmica sob a forma de calor. Numa segunda instância, os mesmos equipamentos consomem outros tipos de energia para o efeito. Como caso concreto simples tem-se o exemplo de equipamentos de AVAC elétricos para o aquecimento ou arrefecimento do interior do edifício. Estes equipamentos consomem energia elétrica para produzir e transferir calor para o interior ou para o exterior do edifício. A QAI depende, normalmente, dos níveis de concentração de gases prejudiciais aos ocupantes do edifício, pelo que o seu controlo consiste, habitualmente, no controlo da ocupação do edifício e na renovação do ar interior, adaptando a utilização de equipamentos de ventilação. Como são utilizados equipamentos AVAC para o efeito, o



controlo da QAI também poderá ter um impacto no conforto térmico do edifício. O conforto visual é afetado pela quantidade e qualidade da luz, natural ou artificial, de que dispõem os ocupantes do edifício e tem um impacto direto sobre a utilização de equipamentos de iluminação, frequentemente, alimentados a partir de energia elétrica. O conceito de conforto, nas suas três componentes, sofre alterações constantes ao longo de cada dia, considerando-se que é um subconceito dinâmico.

Os subconceitos do conceito macro de edifício e as suas relações com os restantes conceitos macro encontram-se representados na Figura 13. Os comportamentos e horários dos utilizadores são, também, considerados relevantes. Tanto os equipamentos para climatização como para iluminação, quando não automatizados, frequentemente, são controlados diretamente pelos utilizadores, através de interruptores manuais ou pela especificação manual de valores de funcionamento. Esta interação tem impacto direto no controlo do conforto, nas suas três vertentes e tem influência indireta no balanço energético.

A ocupação influencia, diretamente, as necessidades de ventilação e climatização, automatizadas ou não. Por outro lado, é o próprio conforto que, para além de limitar a produtividade dos utilizadores, por exemplo em edifícios de escritórios, também tem impacto no seu comportamento. A relação de influência entre o conforto do edifício e o comportamento dos utilizadores é bidirecional. Existe uma influência direta no conforto do edifício nas várias vertentes do contexto.



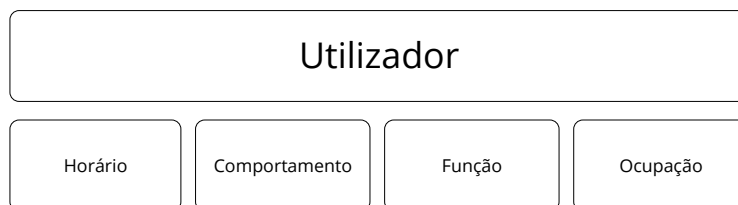
**Figura 13 - Relações diretas entre o conceito de edifício e os restantes conceitos.**

O contexto meteorológico dita as condições atmosféricas exteriores em termos de temperatura, humidade e luminosidade natural e, por isso, o conforto térmico e visual do edifício. As condições atmosféricas podem ter impacto no índice de ocupação do edifício e na QAI. O contexto

socioeconómico e, em particular, o preço da energia, poderá limitar, ou não, a utilização de equipamentos para a manutenção dos melhores níveis de conforto. O contexto temporal, nomeadamente, a estação do ano, o dia da semana e a altura do dia influenciam os níveis de conforto requeridos para o edifício. No caso de edifícios com sistemas de climatização com base em aproveitamento geotérmico, este contexto também é importante para determinar as capacidades de manutenção de níveis de conforto térmico adequados.

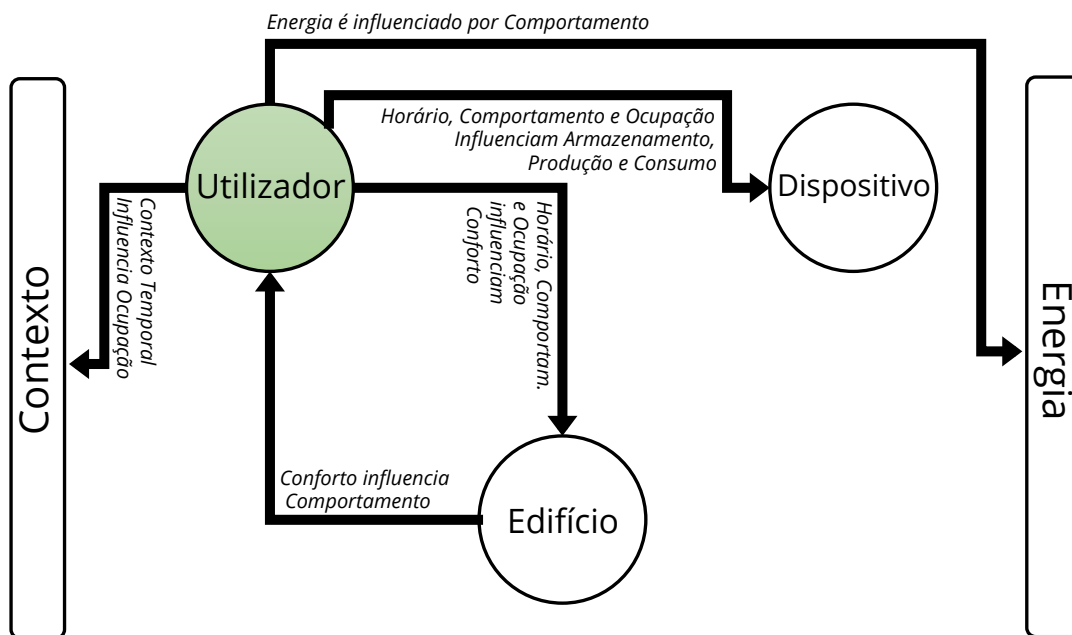
### 3.3.2.2. Utilizador

O utilizador desempenha um papel bastante ativo no balanço energético do edifício. Os seus horários, o seu comportamento, a sua função e, de uma forma geral, a ocupação, determinam os padrões de utilização de dispositivo e necessidades ao nível de conforto. Consideram-se assim estes subconceitos como relevantes para o conceito de utilizador (Figura 14).



**Figura 14 - Conceito de utilizador e respetivos subconceitos.**

Os subconceitos do conceito macro de utilizador e as suas relações com os restantes conceitos macro encontram-se representados na Figura 15. O conforto que o edifício proporciona aos seus utilizadores é controlado, diretamente, por eles próprios, em particular, pelo seu comportamento, pelos seus horários e pelo perfil de ocupação do edifício. A utilização dos equipamentos e dos sistemas do edifício depende destes mesmos fatores, sejam estes equipamentos para efeitos de climatização, iluminação, ou para o desempenho das próprias funções para as quais o edifício foi projetado. O conceito de utilizador influencia, indiretamente, o balanço energético, maioritariamente, a partir da utilização de dispositivos que consomem, produzem ou armazenam energia. No entanto, o balanço energético também é influenciado ao nível térmico pelo comportamento dos utilizadores do edifício, através do ajuste manual da luminosidade do edifício e consequente energia térmica do edifício. A função desempenhada pelo utilizador tem um papel importante no perfil de utilização de determinados equipamentos.



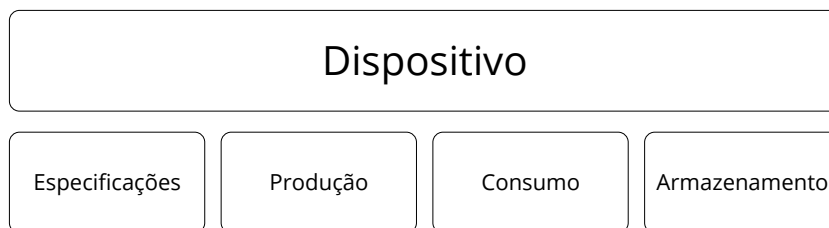
**Figura 15 - Relações diretas entre o conceito de utilizador e os restantes conceitos.**

O contexto temporal tem impacto direto sobre a ocupação do edifício, na presença ou ausência dos utilizadores do edifício em determinado instante, consoante a hora do dia, o dia da semana e o mês, não esquecendo também a existência de feriados e épocas festivas.

Como os horários e funções se mantêm praticamente inalteradas, ao longo do ciclo de vida dos utilizadores, estes subconceitos são considerados estáticos. Já os conceitos de comportamento e ocupação como sofrem alterações constantes ao longo de cada dia, são considerados subconceitos dinâmicos.

### 3.3.2.3. Dispositivo

A utilização dos sistemas e equipamentos do edifício tem uma componente determinante e direta no balanço energético do mesmo. O conceito de dispositivo engloba todos os equipamentos e sistemas do edifício que consomem, produzem ou armazenam algum tipo de energia, de forma automatizada ou não. Consideram-se, por exemplo, soluções de aproveitamento de energia renovável, sistemas para controlo de conforto do edifício (como sistemas AVAC e de iluminação), sistemas de armazenamento de energia, entre outros sistemas necessários ao desempenho operacional do edifício. Qualquer que seja o seu propósito, o impacto do dispositivo no balanço energético depende das suas especificações de consumo, produção ou armazenamento (Figura 16).



**Figura 16 - Conceito de dispositivo e respectivos subconceitos.**

O subconceito das especificações engloba as características do dispositivo que são relevantes para a modelização do consumo, da produção ou do armazenamento de energia, nos seus vários tipos.

No subconceito de produção enquadram-se os perfis de produção de energia do dispositivo em questão (caso este produza algum tipo de energia). Estes dispositivos referem-se a sistemas que contribuem positivamente, para o balanço energético do edifício, num determinado tipo de energia. Neste subconceito, o balanço é influenciado, maioritariamente, ao nível de energia elétrica e térmica (como visto na Secção 2.1). Consideram-se sistemas de aproveitamento de energia renovável, soluções fotovoltaicas, solar-térmicas, geotérmicas ou de geração eólica. Enquadram-se aqui também, por exemplo, soluções de aquecimento, para manutenção das condições de conforto térmico do edifício. De forma semelhante, o subconceito de consumo refere-se aos perfis de consumo de energia do dispositivo (caso consuma algum tipo de energia) e as contribuições negativas do dispositivo para o balanço energético nos vários tipos de energia. Enquadram-se os mesmos sistemas e equipamentos considerados no subconceito de produção.

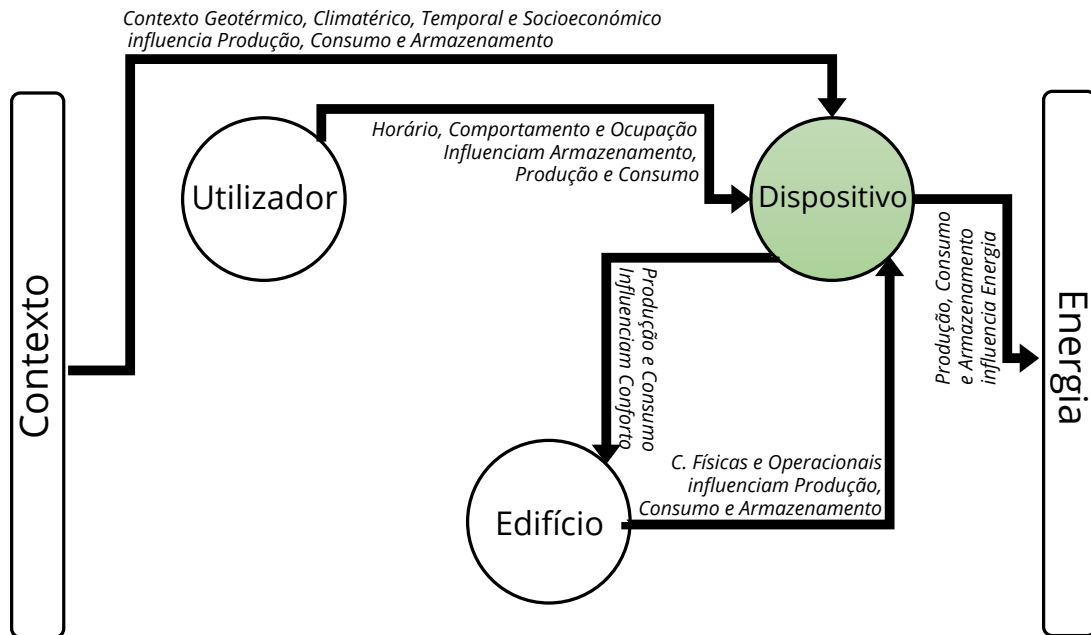
A título exemplificativo, considere-se um gerador eólico. A energia eólica, proveniente do vento e captada pelas pás da turbina, é consumida e transformada para produzir energia elétrica. O dispositivo gerador eólico é, simultaneamente, consumidor de energia eólica e produtor de energia elétrica. Consideram-se as especificações do gerador para produção de energia elétrica em função da velocidade do vento, assim como a quantidade de energia elétrica produzida e a quantidade de energia eólica consumida, ao longo do tempo.

Finalmente, no subconceito de armazenamento incluem-se dispositivos para armazenamento de energia elétrica, térmica e química (esta na forma de hidrogénio).

Tanto a produção como o consumo e o armazenamento de energia são influenciados pelo contexto climatérico, temporal e geotérmico. As características físicas e o conforto do edifício têm influência no desempenho da produção, do consumo e do armazenamento de energia dos dispositivos. Como ao longo do ciclo de vida do dispositivo as especificações mantêm-se praticamente inalteradas, este subconceito é considerado estático. Já os conceitos de produção, de

consumo e de armazenamento, como sofrem alterações constantes ao longo de cada dia, são considerados subconceitos dinâmicos.

Estes subconceitos do conceito macro de dispositivo e as suas relações com os restantes conceitos macro encontram-se representados na Figura 17.



**Figura 17 - Relações diretas entre o conceito de dispositivo e os restantes conceitos.**

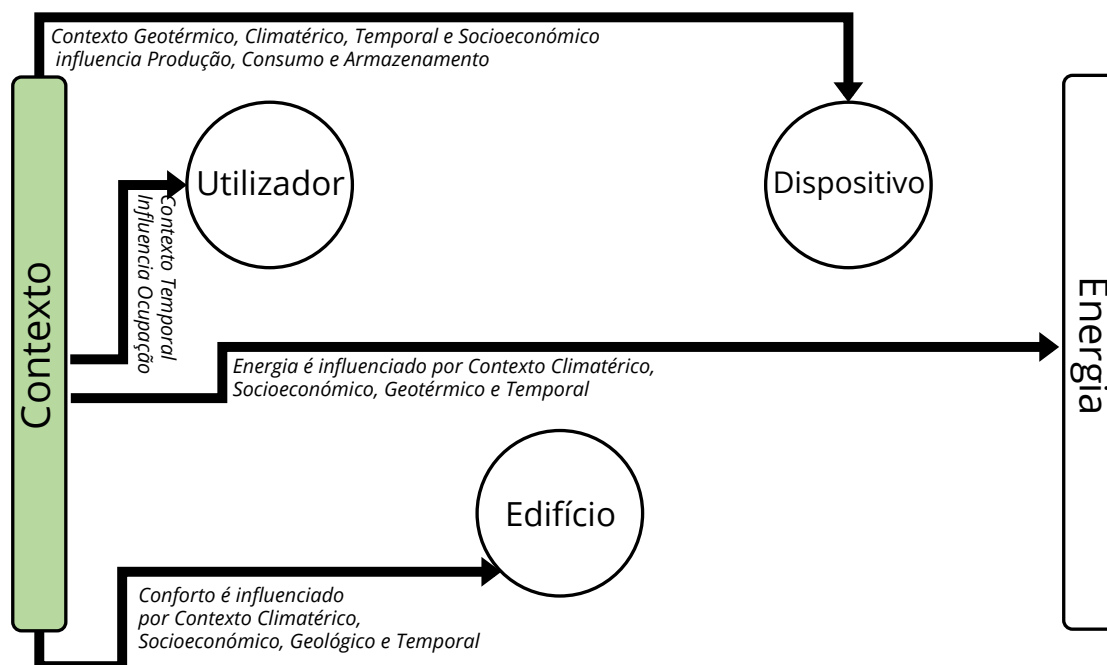
### 3.3.2.4. Contexto

O conceito de contexto representa todas as influências externas ao edifício, seus utilizadores e dispositivos e sobre o balanço energético do edifício. É um conceito dinâmico por natureza e engloba todas as condicionantes climatéricas, temporais, socioeconómicas e geotérmicas. Para o conceito de contexto, foram considerados como subconceitos os contextos Climatérico, Temporal, Socioeconómico e Geotérmico (Figura 18).



**Figura 18 - Conceito de contexto e respetivos subconceitos.**

Os subconceitos do conceito macro de contexto e as suas relações com os restantes conceitos macro encontram-se representados na Figura 19. Como foi visto, o contexto influencia diretamente todos os restantes conceitos à exceção do perfil de ocupação no conceito de utilizador, que é apenas influenciado pelo contexto temporal. Todos os restantes conceitos são influenciados pelos contextos temporal, climatérico, geotérmico e socioeconómico. Em particular, no conceito de energia, considera-se que os contextos temporal, climatérico e geotérmico têm impacto na energia renovável disponível para aproveitamento e, ainda, nas perdas energéticas sob a forma de calor para o exterior do edifício.



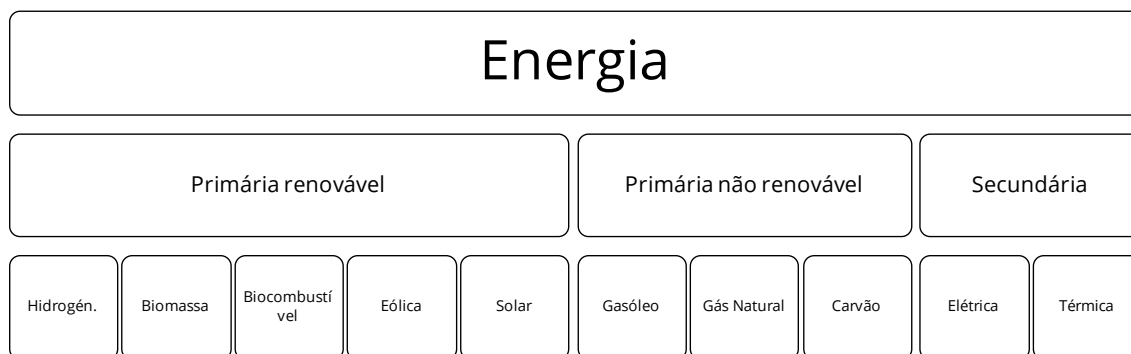
**Figura 19 - Relações diretas entre o conceito de contexto e os restantes conceitos.**

Por outro lado, o contexto socioeconómico dita o preço da energia e, como tal, influencia a energia que é consumida sob a forma de eletricidade ou de combustíveis fósseis.

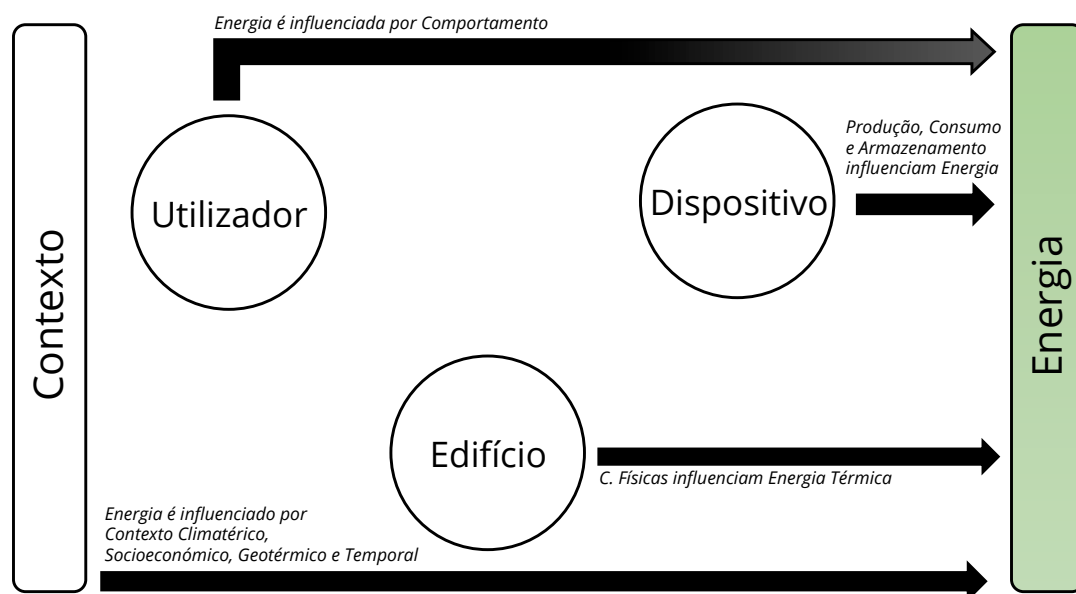
### 3.3.2.5. Energia

Existem diferentes formas de classificar e categorizar a energia. Uma das formas é classificar a energia quanto ao seu tipo e à sua proveniência, em termos de renovabilidade [92].

Como representado na Figura 20, o conceito de energia engloba três subconceitos principais: energia primária renovável, energia primária não renovável e energia secundária. A energia primária, que inclui as fontes de energia extraídas ou retiradas diretamente do meio ambiente, é dividida em energia renovável e energia não renovável.



**Figura 20 - Conceito de energia e respetivos subconceitos.**



**Figura 21 - Relações diretas entre o conceito de energia e os restantes conceitos.**

Na energia primária não renovável integram-se alguns tipos de energia como o gasóleo, o gás natural e o carvão. Da mesma forma, para o subconceito de energia primária renovável consideraram-se o hidrogénio, a biomassa, os biocombustíveis, a energia eólica e a energia solar. Como energia secundária, ou seja, energia resultante da transformação de energia primária, consideraram-se a energia elétrica e a energia térmica. As relações entre o conceito de energia e os restantes conceitos e subconceitos, que já foram descritas nas secções anteriores, encontram-se representadas na Figura 21.

## 3.4. Processo de instanciação do modelo conceptual

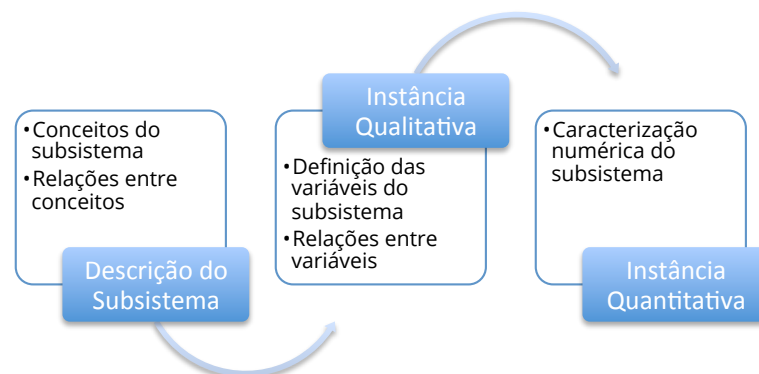
### 3.4.1. Abordagem de submodelização

Pretende-se especificar uma abordagem de modelização genérica, adaptável e escalável a qualquer subsistema do balanço energético em edifícios, que assente no modelo conceptual apresentado na secção 3.3.

A modelização do balanço energético de um sistema e, no caso particular de um edifício, consiste num problema de modelização complexo, com diversos intervenientes e variáveis a considerar no sistema. É necessária uma abordagem de modelização que permita modelizar partes específicas do sistema global de uma forma mais desagregada, podendo ser utilizada uma abordagem de modelização com base em submodelos de forma a reduzir a complexidade, tanto da modelização, como da simulação. A adoção de uma abordagem de submodelização, com base em agregações de submodelos individuais, que formam um modelo complexo, resultado da agregação de vários submodelos, facilitará o processo de modelização e promoverá a adaptabilidade e estabilidade desse mesmo modelo e dos respetivos submodelos.

### 3.4.2. Fases de instanciação

A abordagem proposta para modelização consiste num processo estratificado de instanciações qualitativas e quantitativas do modelo conceptual, de forma hierárquica e gradual, como está representado na Figura 22. O processo de modelização tem como base o modelo conceptual e as relações que, de uma forma macroscópica, se encontram identificadas na Figura 10. Esta base inclui a descrição do subsistema, com a aquisição de informação relevante e a sua organização em estruturas de dados que reflitam os conceitos definidos pelo modelo conceptual.



**Figura 22 – Fases do processo de modelização.**



O modelo conceptual é instanciável, qualitativamente e quantitativamente. As instâncias do modelo conceptual consistem na particularização dos conceitos e das respetivas relações em subsistemas concretos, cujos atributos se enquadrem nos conceitos do modelo.

A instanciação do modelo conceptual, num modelo qualitativo, consiste em definir quais as variáveis envolvidas num determinado subsistema, como se podem modelizar as suas interdependências e como o subsistema se relaciona com os outros em termos de variáveis de entrada e saída. Os modelos qualitativos são modelos formais que fornecem informação sobre os mecanismos causais e variáveis relevantes por trás do comportamento simulado dos sistemas modelizados, sem a necessidade de dados numéricos ou fórmulas matemáticas complexas, e que permitem potenciar a simplicidade do modelo.

A instanciação quantitativa do modelo conceptual permite caracterizar, numericamente, a particularização definida na respetiva instância qualitativa. Tradicionalmente, a modelização quantitativa e as respetivas ferramentas de simulação permitem obter respostas numéricas precisas. Apesar de estas ferramentas se revelarem bastante úteis para problemas complexos, onde a precisão é um elemento chave, os resultados são, frequentemente, demasiado elaborados para problemas que carecem de uma abordagem mais abstrata e não-numérica. Nestes casos, existem vantagens na utilização de uma abordagem de modelização qualitativa, principalmente em problemas onde não existe suficiente conhecimento numérico dos sistemas. O uso de modelos qualitativos reduz a complexidade do processo de modelização.

A Figura 23 mostra com mais detalhe os vários passos que fazem parte do processo de modelização proposto. Para descrever cada uma das etapas representadas na figura, com maior clareza, considerou-se um exemplo de aplicação para abordagem de modelização, nomeadamente, o sistema de um edifício composto (entre outros) pelo subsistema de um gerador eólico. Como é descrito na Figura 22, o processo de modelização inicia-se com a descrição do subsistema, através de um submodelo, suportado pelo modelo conceptual especificado na Secção 3.3. São as características do subsistema que determinam os vários componentes (suposições, condições, elementos, relações, entradas e saídas) da descrição do submodelo e que são concretizadas com os conceitos definidos pelo modelo conceptual. Estes aspetos são descritos com maior pormenor na Secção 3.4.3.

No exemplo do gerador eólico, as entradas correspondem à velocidade do vento (conceito de contexto meteorológico) e ao tempo (conceito de contexto temporal), e a saída à energia produzida (conceito de dispositivo de produção).

A energia produzida condiciona o balanço energético do sistema (conceito de energia elétrica). As relações entre entradas e saídas é especificada de acordo com as relações entre os conceitos descritos na Secção 3.3, nomeadamente:

- Influência do contexto meteorológico e do contexto temporal na produção de energia elétrica do dispositivo;
- Influência da produção de energia elétrica do dispositivo no balanço de energia elétrica do edifício.

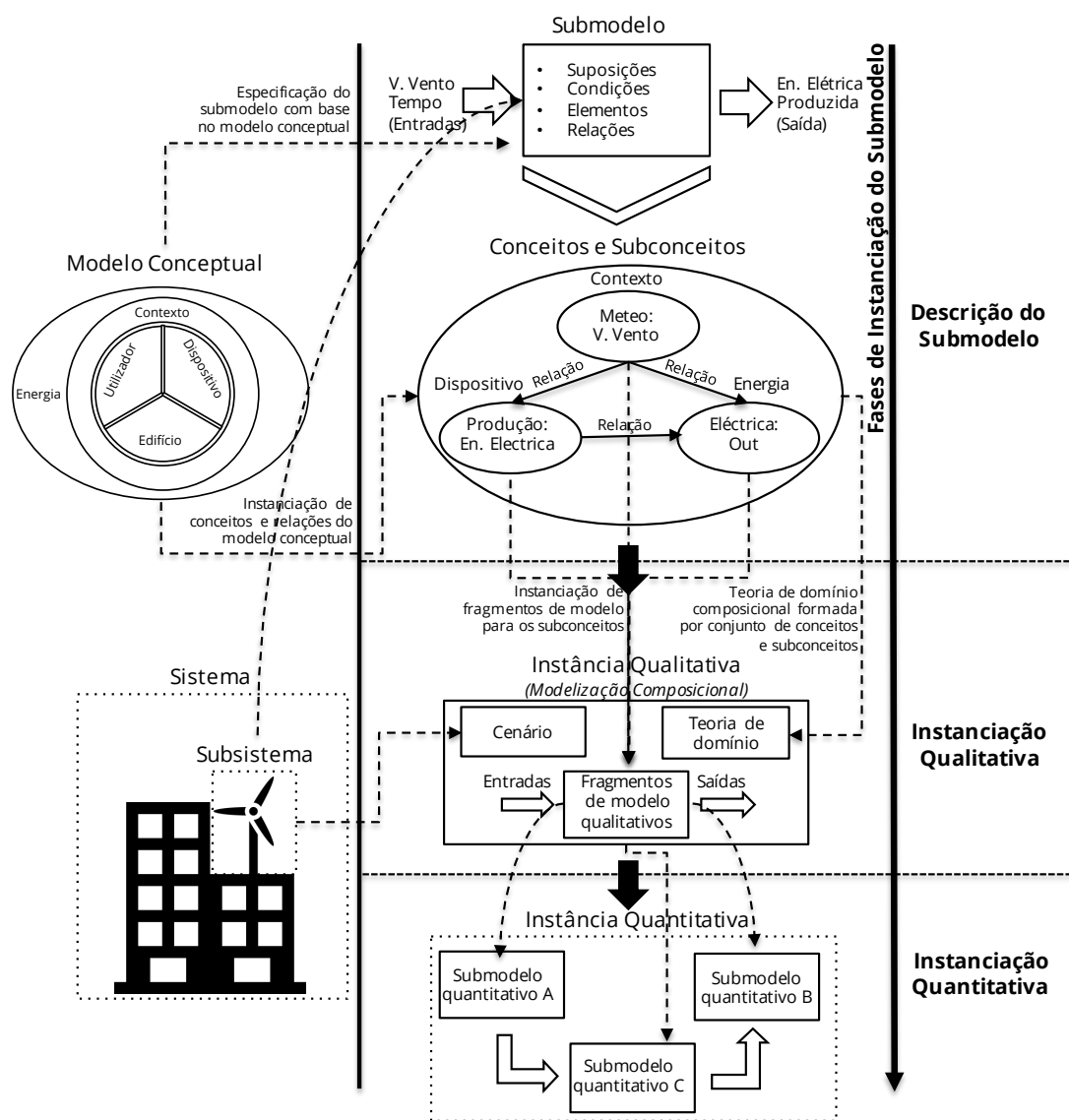


Figura 23 - Processo de modelização.

São ainda especificadas as condições (por exemplo, o desempenho do gerador), os elementos (por exemplo, a existência de uma caixa de velocidades) e as suposições relevantes (por exemplo, o gerador estar localizado na cobertura do edifício considerado).

O passo seguinte da abordagem de modelização consiste na instanciação qualitativa a partir da descrição do submodelo, com a particularização dos componentes da descrição do submodelo numa vertente qualitativa. Optou-se pela modelização composicional, como método de especificação de modelos qualitativos, por permitir especificar de forma detalhada o modelo em termos qualitativos e por partilhar de características comuns ao processo de modelização proposto, nomeadamente a sua natureza de submodelização (baseada em fragmentos de modelo). A modelização composicional (descrita com mais detalhe na Secção 3.4.4) especifica uma teoria de domínio, um cenário e os fragmentos de modelo para a instância qualitativa. No exemplo de aplicação do gerador eólico considera-se um cenário que consiste num gerador eólico com determinadas características e situado num determinado local. Os vários conceitos e subconceitos constituem, no seu conjunto, a teoria de domínio do submodelo e são concretizados, qualitativamente, através de fragmentos de modelo que representam particularizações da instância do submodelo para os diferentes subconceitos. No exemplo de aplicação do gerador eólico podem ser definidos fragmentos de modelo como a variação da velocidade do vento em função da estação do ano, ou potência elétrica em condições de vento extremas. Nestes fragmentos de modelo são definidas, com clareza, as variáveis de entrada e saída e é modelizado o seu comportamento de forma qualitativa.

A fase de instanciação qualitativa é a base para a fase de instanciação quantitativa. Os fragmentos de modelo qualitativos são concretizados, quantitativamente, em submodelos, através de equações diferenciais, ou mesmo utilizando técnicas de aprendizagem de modelos e agrupados, para formarem modelos mais abrangentes. Em termos quantitativos podem ser consideradas relações/equações como

$$P = 0.5 \cdot \rho \cdot A \cdot C_p \cdot V^3 \cdot \eta_g \cdot \eta_b \quad (3.1)$$

para a potência elétrica do gerador eólico, e

$$W = \int P \cdot dt \quad (3.2)$$

para a energia gerada, onde  $\rho$  representa a densidade do ar,  $A$  a área da turbina,  $C_p$  o coeficiente de desempenho,  $V$  a velocidade do vento,  $\eta_g$  o rendimento do gerador,  $\eta_b$  o rendimento da caixa de velocidades,  $W$  a energia gerada e  $T$  o tempo. São definidas ainda as condições iniciais (como por exemplo a velocidade e direção do vento) e elementos como as quantidades  $A$ ,  $C_p$ ,  $\eta_g$  e  $\eta_b$ .

### 3.4.3. Descrição de submodelos

O processo de modelização descrito pretende adaptar-se a uma ampla variedade de cenários e problemas, enquanto permite manter o controlo sobre as dimensões abrangidas pelos modelos desenvolvidos. Também se pretende simplificar a aquisição, a manutenção e a reutilização de informação. Para isso é necessário caracterizar os vários conceitos que se aplicam ao modelo, de forma individual e independente. Justifica-se uma abordagem de submodelização, baseada em submodelos, tão simples quanto necessários, que possam ser agregados e organizados à medida que estes vão sendo necessários, para formar o modelo de um sistema mais completo. Os submodelos não necessitam de representar sistemas ou processos na sua totalidade, podendo ser formalizados consoante o nível de granularidade necessário.

Contudo, um conjunto de equações isoladas não constitui um submodelo. Este engloba, implicitamente, parâmetros ou elementos físicos, um conjunto de suposições e aproximações e outros critérios relevantes. Para automatizar a formulação de submodelos e facilitar a sua reutilização, os componentes do submodelo devem ser tornados explícitos. É necessário caracterizar o submodelo em termos de variáveis de entrada e saída esperadas, os elementos de informação relevantes para o submodelo e respetivas inter-relações, as condições para a sua aplicabilidade e as suposições que o submodelo faz sobre o subsistema real que se pretende modelizar. Os componentes estão representados na Figura 24.

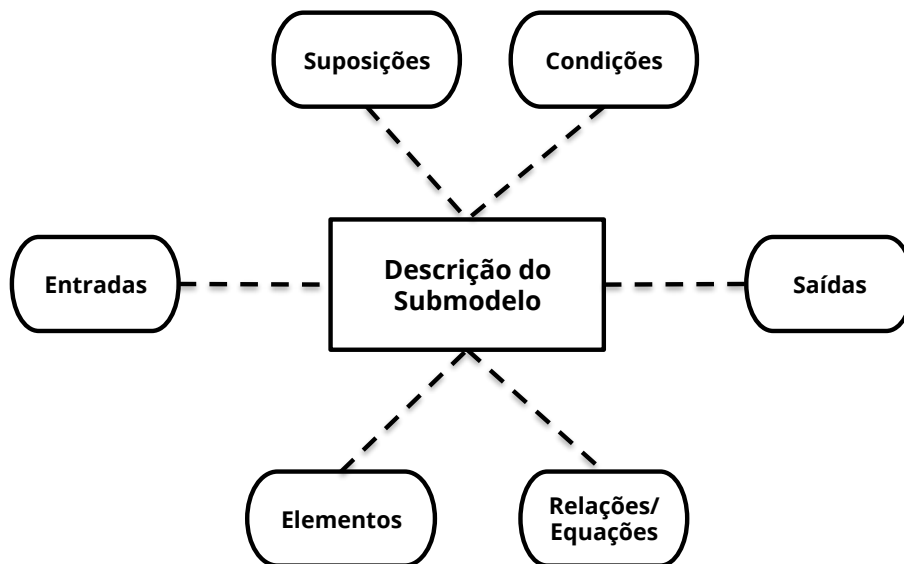


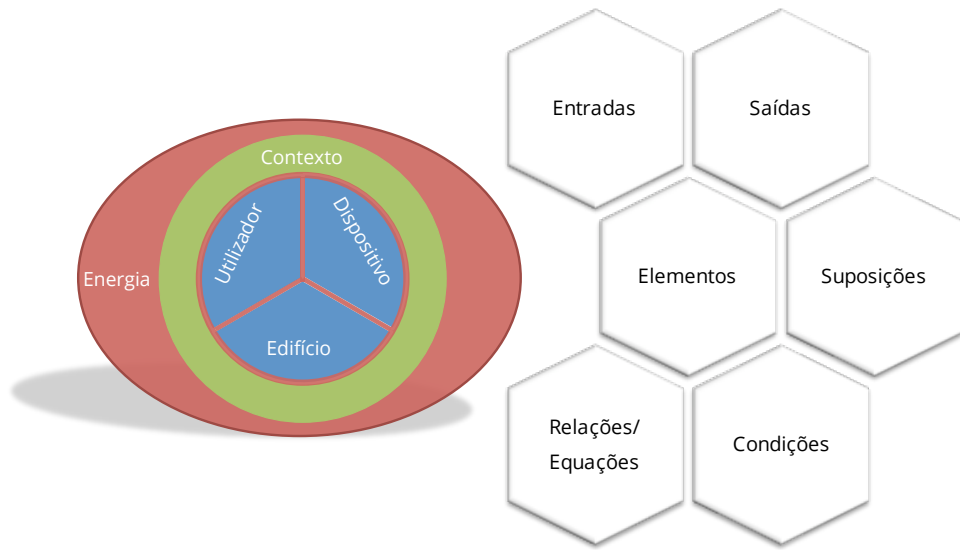
Figura 24 - Componentes do submodelo.

O submodelo deverá ser aplicável apenas a um determinado conjunto de subsistemas que apresentem determinadas características, pelo que é necessário especificar o conjunto de condições de operações que delimitam o âmbito aplicacional do submodelo.

Assim, cada submodelo tem um conjunto de *entradas* ( $e_i$ ), *saídas* ( $s_i$ ), *elementos* ( $e_i$ ), *suposições* ( $su_i$ ), relações entre *entradas* e *saídas* ( $\{r_i\} = \{e_i \rightarrow s_j\}$ ) e *condições* ( $c_i$ ) do submodelo:

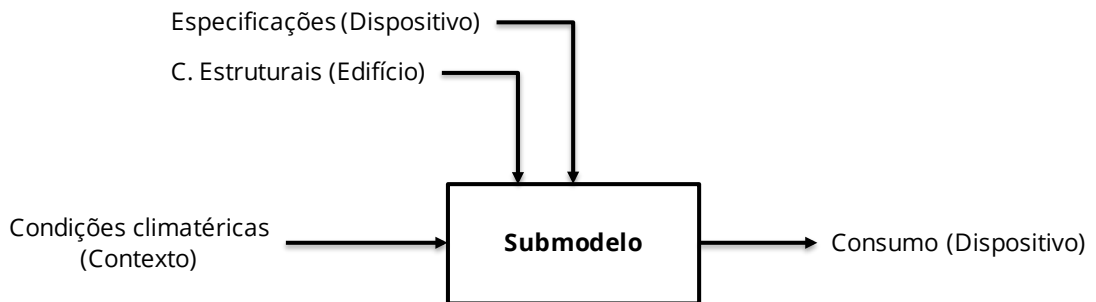
$$\text{submodelo} \left\{ \begin{array}{l} \text{entradas: } \{e_1, e_2, \dots, e_i\} \\ \text{saídas: } \{s_1, s_2, \dots, s_i\} \\ \text{elementos: } \{el_1, el_2, \dots, el_i\} \\ \text{suposições: } \{su_1, su_2, \dots, su_i\} \\ \text{relações: } \{r_1, r_2, \dots, r_i\} \\ \text{condições: } \{c_1, c_2, \dots, c_i\} \end{array} \right. \quad (3.3)$$

Os componentes da descrição do submodelo encontram-se enquadrados nos conceitos e sub-conceitos definidos pelo modelo conceptual, como representado na Figura 25.



**Figura 25 - Enquadramento dos componentes da descrição do submodelo nos conceitos do modelo conceptual.**

Considere-se o exemplo da descrição de um submodelo para análise da influência do contexto climático no consumo elétrico de um dispositivo de climatização, representado na Figura 26.



**Figura 26 - Exemplo da descrição de um submodelo para análise da influência do contexto climático no consumo elétrico de um dispositivo.**

De acordo com as relações do modelo conceptual, identificadas no capítulo anterior, o submodelo deverá considerar, como variáveis de entrada, os conceitos de dispositivo (com as suas especificações operacionais ao nível de consumo de energia), de edifício (com as suas características estruturais) e de contexto (com as condições climatéricas a que está exposto o sistema) e, como variáveis de saída, o conceito de dispositivo (com o seu perfil de consumo eléctrico). O submodelo é descrito com os componentes seguintes:

- As condições climatéricas (por exemplo, temperatura e humidade) como entrada;
- O consumo eléctrico do dispositivo como saída;
- As especificações do dispositivo (por exemplo, potência eléctrica nominal) e as condições estruturais do edifício (área) como elementos;
- Como suposição o dispositivo pertencer ( $\in$ ) ao edifício do sistema;
- Que as condições climatéricas e as especificações operacionais do dispositivo estão relacionadas ( $\rightarrow$ ) com consumo eléctrico do dispositivo.

O submodelo descrito é especificado da seguinte forma:

$$\left\{ \begin{array}{l} \{e_1\} = \{temperatura \text{ e } humidade (Contexto)\} \\ \{s_1\} = \{consumo eléctrico (Dispositivo)\} \\ \{el_1, el_2\} = \{potência eléctrica (Dispositivo), área (Edifício)\} \\ \{su_1\} = \{Dispositivo \in c. estruturais (Edifício)\} \\ \{r_1, r_2\} = \{condições climatéricas (Contexto) \rightarrow consumo (Dispositivo), \\ \quad especificações (Dispositivo) \rightarrow consumo (Dispositivo)\} \end{array} \right. \quad (3.4)$$

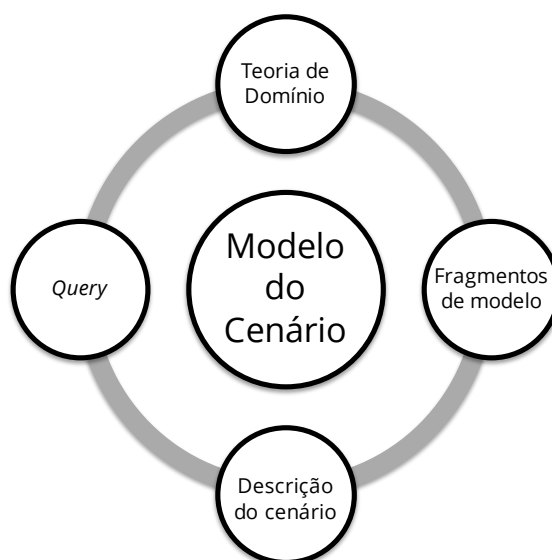
### 3.4.4. Modelização qualitativa

#### 3.4.4.1. Modelização composicional

Pretende-se definir uma metodologia de instanciação qualitativa do modelo conceptual proposto que seja aplicável a qualquer sistema (e/ou respetivos subsistemas) que se enquadre no balanço energético em edifícios. Para isso, é necessário representar o conhecimento sobre esse subsistema, do ponto de vista da engenharia, determinando o intervalo de conhecimento que é necessário para essa representação. Optou-se pela modelização composicional [93], onde o conhecimento do domínio do sistema é decomposto em fragmentos de modelo semi-independentes (ou seja, que podem depender apenas deles próprios ou também de outros fragmentos de modelo), que modelizam objetos e processos desse domínio.

O sistema a ser modelizado é designado por cenário e o respetivo modelo denomina-se modelo do cenário. A modelização composicional propõe uma abordagem de modelização estrutura-

da e escalável, que assenta na construção de uma teoria de domínio para descrever o domínio do sistema físico ou problema. A teoria de domínio é composta por conjuntos de fragmentos de modelo, categorizados e organizados pelo domínio físico a que se aplicam, e onde cada fragmento modeliza alguma parte fundamental do domínio do sistema, sejam processos ou objetos. A modelização composicional define um fragmento de modelo como sendo um conjunto de indivíduos, suposições, condições de operação e relações, à semelhança dos componentes propostos na Secção 3.4.3 para a descrição de submodelos. Idealmente, o modelo do cenário pode ser construído a partir da instanciação de fragmentos de modelo, que pertencem à teoria de domínio, para a modelização sistema em questão.



**Figura 27 - Formulação do modelo qualitativo.**

Como representado na Figura 27 a modelização composicional define o problema da formulação de modelos a partir de:

- Uma descrição do cenário  $S$ , ou seja, da sua estrutura física e do conjunto de declarações sobre o seu comportamento (como por exemplo, as condições iniciais e limites de aplicabilidade, entre outros);
- Uma teoria de domínio  $Th$ , que consiste em conjuntos de fragmentos de modelo  $\{m_1, \dots, m_n\}$  que modelizam processos ou objetos no domínio do sistema (ou cenário) a modelizar;
- Uma *query*, ou seja, uma consulta sobre o comportamento de elementos do cenário (por exemplo, qual o efeito da velocidade do vento na produção de energia elétrica?), que relaciona fragmentos de modelo da teoria de domínio  $Th$ , com o cenário  $S$ .

A abordagem da modelização composicional sustenta-se num processo constituído por: a) a composição do modelo; b) a utilização e a validação do modelo; e c) a revisão do modelo, caso seja necessário. Os vários passos deste processo encontram-se representados na Figura 28. A composição do modelo consiste em relacionar a *query* com os vários fragmentos de modelo da teoria de domínio. O seu conjunto de fragmentos de modelo é definido *à priori*, com base nas necessidades e restrições do domínio e da topologia do cenário em questão. O modelo do cenário resultante deverá ser o mais útil e coerente, e o mais simples e consistente, de acordo com os objetivos pretendidos. A validação do modelo pode depender de suposições sobre aspetos desconhecidos do comportamento do sistema. A análise do comportamento do modelo pode revelar inconsistências entre o que é esperado e o que é obtido, conduzindo ao seu aperfeiçoamento.

**Query:** Qual o efeito das variáveis de entrada X e Y na variável de saída Z do sistema?

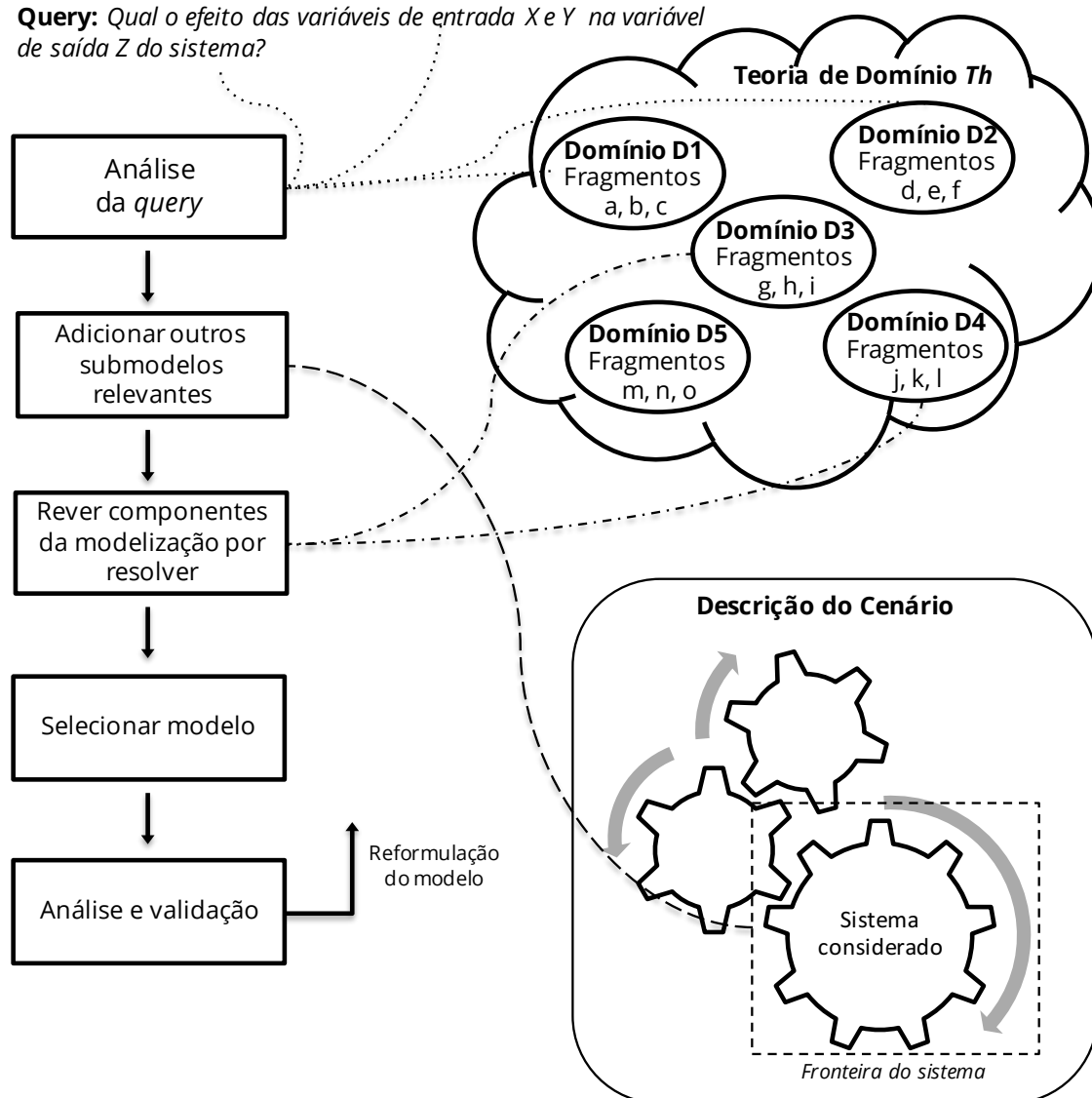


Figura 28 – Representação do processo de modelização composicional (figura adaptada de [93]).



### 3.4.4.2. Abordagem composicional para instanciação qualitativa do modelo conceptual

Aplicou-se a metodologia de modelização composicional, à abordagem de modelização conceptual proposta para o balanço energético do edifício. Na Figura 29 encontra-se um exemplo de instanciação, baseada em modelização composicional, aplicada ao modelo conceptual proposto.

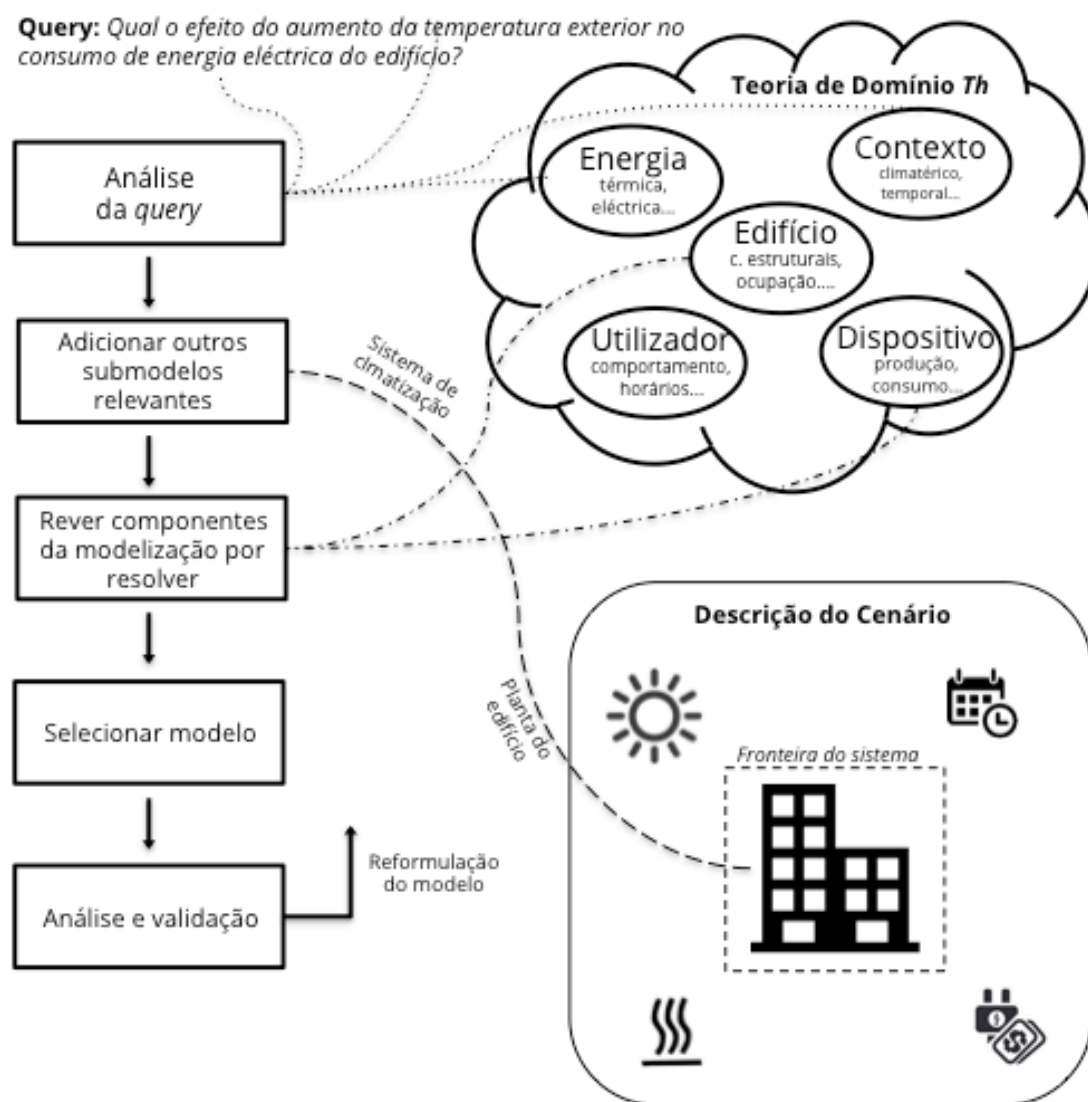


Figura 29 - Aplicação da modelização composicional ao modelo conceptual proposto.

O objetivo é formalizar uma metodologia de instanciação qualitativa que partilhe das premissas consideradas na abordagem de modelização proposta. Para isso estabeleceram-se as considerações seguintes:

- A descrição do cenário *S* consiste no sistema do balanço energético de um edifício, constituído por subsistemas enquadrados num contexto temporal, climático, socioeconómico e geotérmico;

- A teoria de domínio  $Th$ , consiste em conjuntos de subconceitos que se enquadram nos conceitos do modelo conceptual proposto, nomeadamente edifício, utilizador, dispositivo, contexto e energia. Os conceitos são equiparados aos domínios físicos dos fragmentos de modelo e os subconceitos são equiparados aos próprios fragmentos de modelo.

No caso particular da Figura 29, pretende-se analisar o efeito da temperatura exterior no consumo eléctrico do edifício. Uma abordagem inicial permite identificar como conceitos e subconceitos relevantes, o contexto meteorológico e a energia eléctrica, para a modelização dos subsistemas da temperatura externa e do balanço de energia eléctrica do edifício. No entanto, a análise da *query* deste exemplo, requer a inclusão de outros subconceitos, como o consumo eléctrico do dispositivo constituído pelo sistema de climatização do edifício. O subconceito da planta do edifício é também relevante, visto o sistema de climatização estar localizado e distribuído pelas instalações do edifício.

Por motivos de clareza e simplificação, considera-se para este exemplo apenas a modelização dos subsistemas do consumo eléctrico do dispositivo (climatização) e do balanço de energia eléctrica. O caso de aplicação considerado inclui assim os fragmentos de modelo (ou subconceitos)  $CE$ : Consumo Eléctrico e  $BE$ : Balanço de energia eléctrica, representados na Figura 30.

#### Cenário S:

$T_e$  - Temperatura externa (Contexto:Climatérico)  
 $P_e$  - Potência eléctrica (Especificações:Dispositivo)  
 $L$  - Localização (Edifício:C. Estruturais)

#### Teoria de Domínio $Th$ :

$CE$  (Consumo Eléctrico):  $T_e \wedge P_e \wedge L \rightarrow I(CE, P_e) \wedge I(CE, T_e) \wedge Quantidade(CE)$   
 $BE$  (Balanço de Energia Eléctrica):  $Quantidade(CE) \rightarrow I^-(BE, Quantidade(CE))$

#### Instanciação de $Th$ em S:

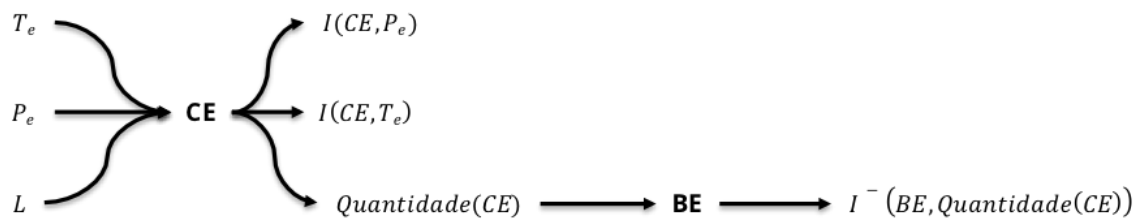


Figura 30 - Exemplo de instanciação de um modelo composicional.

O fragmento de modelo  $CE$  surge da instanciação do exemplo considerado na descrição de submodelos apresentado na Secção 3.4.3 onde se pretende analisar a influência do contexto climatérico no consumo eléctrico de um dispositivo.

As entradas, as saídas e os elementos estabelecidos no exemplo da descrição do submodelo são instanciados, qualitativamente, como indivíduos de um fragmento de modelo composicional. Incluem-se as condições climáticas, neste caso a temperatura externa (contexto), como entrada, o consumo elétrico (dispositivo) como saída, as especificações do sistema de climatização, neste caso a potência elétrica (dispositivo), e as características estruturais (edifício) como elementos.

São definidas, também, as relações entre: a) as condições climáticas e o consumo do sistema de climatização; e b) as especificações do sistema de climatização e o seu consumo. Estas relações são instanciadas no fragmento de modelo composicional através de equações de *Qualitative Processing* (QP) [93], nomeadamente:

- $I(CE, P_e)$ , que define a influência direta da potência elétrica do dispositivo no seu consumo elétrico;
- $I(CE, T_e)$ , que define a influência direta da temperatura externa no consumo elétrico do dispositivo.

Em *CE* é considerada, também, a suposição de que o dispositivo existe nas instalações do edifício. Desta forma surge a necessidade de considerar o conceito de edifício e as respetivas características estruturais.

No fragmento de modelo *BE* pretende-se instanciar um modelo qualitativo para a modelização do balanço de energia elétrica (energia) em função do consumo do sistema de climatização do edifício (dispositivo). Neste caso, o fragmento de modelo *BE* recebe o resultado de *Quantidade* (*CE*) como variável de entrada e define, como resultado, uma influência direta negativa do consumo elétrico do sistema de climatização para o balanço de energia elétrica do edifício.

Para desenvolver modelos de simulação qualitativos e para validar instâncias qualitativas do modelo conceptual, optou-se por usar a ferramenta de modelização qualitativa GARP3 [94], visto ser a ferramenta utilizada com maior frequência na construção de modelos qualitativos de simulação, por abordagem composicional [95][96].

O GARP3 consiste num pacote de *software* para modelização e simulação qualitativa. Permite a construção de modelos qualitativos, bem como a execução e análise de simulações com base nesses modelos, a partir de um conjunto integrado de ferramentas.

Para apoiar a modelização, o GARP3 oferece um *workbench* gráfico que permite ao utilizador construir modelos qualitativos de sistemas de uma forma intuitiva. Um modelo é construído utilizando blocos do *workbench* para a especificação de entidades e quantidades, entre outros, e combinando-os em agregações desses blocos, tais como cenários e fragmentos de modelos (o conceito de entidade, quantidade e cenário são descritos mais à frente no texto). As restrições embutidas no *software* impedem que sejam criados modelos que, sintaticamente, estejam incorretos. Quando o modelo se encontra suficientemente especificado, pode ser usado para

executar simulações. O motor de simulação gera gráficos de transição de estado, para um cenário particular. Os gráficos representam as transições de estado possíveis do sistema, dado o conhecimento especificado no modelo. Cada estado representa o sistema num determinado ponto (ou intervalo) no tempo.

O GARP3 considera três tipos de blocos para construção de modelos:

- Entidades, como conceitos abstratos que desempenham um papel no sistema;
- Configurações, que são utilizadas para representar relações estruturais entre entidades, através da especificação de ligações entre instâncias de entidades em cenários ou fragmentos de modelo;
- Quantidades e espaços quantitativos, que representam características e intervalos qualitativos de entidades que sofrem mudanças de estado.

Estes blocos são utilizados na construção de cenários para descrever o estado e configuração inicial de um sistema em fragmentos do modelo. Estes últimos constituem partes genéricas e reutilizáveis do modelo qualitativo e contêm conhecimento sobre processos ou aspetos estáticos do sistema.

Por motivos de clareza, considere-se a aplicação do GARP3 ao exemplo da Figura 29 e da Figura 30. Para se desenvolver o modelo de simulação qualitativo foram considerados, como entidades, alguns dos conceitos abstratos que fazem parte da teoria de domínio e que são necessários à construção de modelos de simulação qualitativos, para o subsistema da climatização do edifício, nomeadamente: o contexto (meteorológico) e o dispositivo (especificações de consumo elétrico). Estas entidades, a utilizar na especificação do cenário do modelo e nos fragmentos de modelo, estão representadas na Figura 31. As entidades estão representadas a vermelho, com posições hierárquicas entre elas, representadas com setas. Desta forma, uma entidade pode conter sub-entidades. Neste caso temos duas entidades, “Contexto” e “Dispositivo”, e duas sub-entidades, “Meteorológico” e “Consumo”. A entidade “Meteorológico” pertence a “Contexto” e, por sua vez, a entidade “Consumo” pertence a “Dispositivo”.

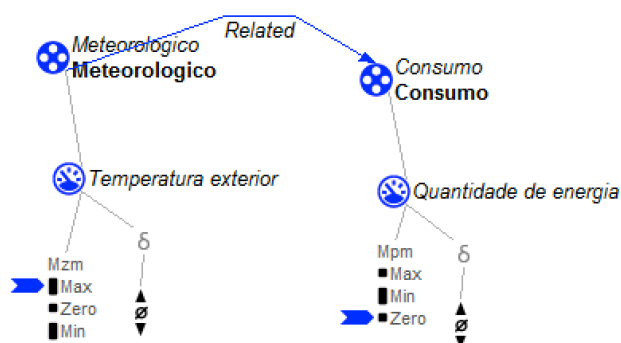


**Figura 31 - Entidades dos fragmentos do modelo de simulação qualitativo para o sistema de arrefecimento.**

Como espaços qualitativos consideraram-se a temperatura exterior (contexto meteorológico) e a quantidade de energia (consumo do dispositivo):

- Temperatura exterior, com a quantidade “Mzm” e com valores “Max”, “Zero” e “Min”;
- Quantidade de energia, com a quantidade “Mpm” e com valores “Max”, “Min” e “Zero”.

O cenário do modelo, representado na Figura 32, especifica o estado inicial considerado para o sistema. Este estado inicial é especificado utilizando as entidades especificadas na Figura 31, assim como os espaços quantitativos e respectivas quantidades, também especificados anteriormente. No cenário do modelo são também utilizadas configurações, definem as relações entre entidades existentes no respetivo cenário, e que podem não estar relacionadas hierarquicamente. As entidades e configurações definem os requisitos para que um modelo de fragmento seja aplicável a esse cenário. Para este cenário foi especificada uma configuração entre as entidades de Contexto Meteorológico e Consumo do Dispositivo, representada pela seta azul. Esta configuração é independente das posições hierárquicas específicas na Figura 31.



**Figura 32 – Cenário do modelo de simulação qualitativo para o sistema de arrefecimento.**

É sobre o cenário definido que os modelos de fragmento são simulados e as suas quantidades atualizadas a cada iteração. Como condições iniciais do cenário (marcadores azuis na figura) especificou-se que o sistema se encontra a operar com temperatura exterior máxima. Não existindo tendências de incremento ou decremento de quantidades ( $\delta$ ) parametrizadas em nenhuma das entidades, os valores qualitativos dependem apenas das condições iniciais parametrizadas e das relações de influência dos fragmentos de modelo, descritos mais à frente.

De forma a simular, qualitativamente, as instâncias do modelo conceptual, foi construído o fragmento do modelo de simulação correspondente a CE na Figura 30, que modeliza a influência das condições meteorológicas no consumo de energia elétrica em arrefecimento. Este exemplo considera apenas a temperatura exterior como parâmetro relevante para o estudo.

O presente fragmento do modelo de simulação pretende modelizar, qualitativamente, o comportamento do balanço de energia elétrica do sistema, em função do consumo elétrico do dispositivo de climatização para arrefecimento e do contexto temporal.

A especificação de fragmentos de modelo assenta nos mesmos elementos utilizados para a especificação de cenários, isto é, entidades, configurações e quantidades. Existem, contudo, algumas particularidades na especificação de fragmentos de modelo, nomeadamente:

- O fragmento de modelo deverá ser coerente com o respetivo cenário em termos de entidades e relações entre entidades (configurações);

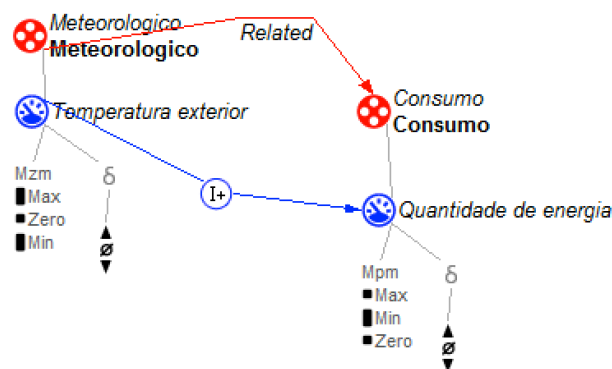
- Especificação de relações de dependência entre quantidades, para modelizar o comportamento de cada entidade em termos qualitativos.

De acordo com a Figura 29, e como especificado na Figura 30, para se modelizar, qualitativamente, a influência do contexto meteorológico no consumo de energia elétrica em arrefecimento, deve ser considerado o fragmento para modelização do consumo do dispositivo de climatização (Figura 33), com a caracterização do comportamento do consumo do sistema de arrefecimento em função do contexto meteorológico (a partir de informação como a potência elétrica nominal do sistema e a sua localização), composto pelas entidades e intervalos qualitativos seguintes:

- Entidade Meteorológico, com o intervalo qualitativo Temperatura exterior;
- Entidade Consumo, com o intervalo qualitativo Quantidade de energia.

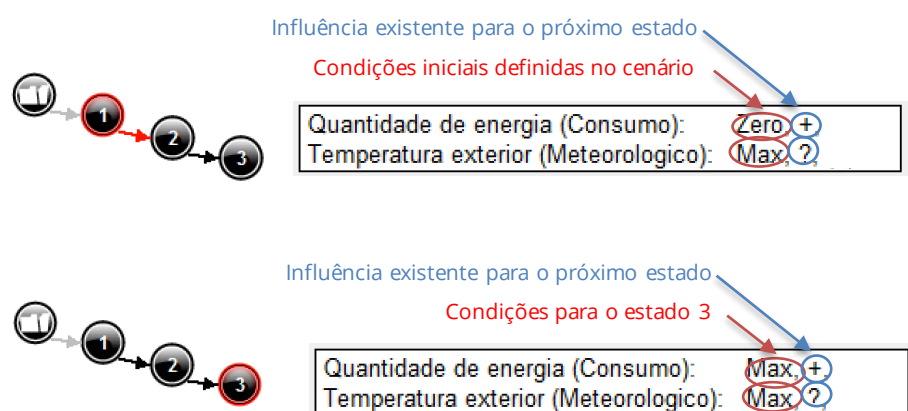
De forma a garantir a aplicabilidade do modelo em questão ao cenário descrito, foram mantidas, no fragmento de modelo, as entidades e configurações especificadas no cenário (representadas a vermelho). Estas entidades e configurações determinam que será necessário o cenário ter alguma entidade “Meteorológico” e “Consumo”, com uma relação entre ambas, para que o fragmento de modelo fique “ativo”.

Foram ainda definidas relações de influência entre as duas quantidades (setas azuis). O fragmento de modelo de simulação foi especificado com uma relação de influência positiva ( $I^+$ ). Esta relação de influência foi identificada com base em estudos analisados no Capítulo 2 e com base nas considerações referidas na Secção 3.3.2.4. Assumiu-se que a quantidade de energia consumida em arrefecimento é diretamente influenciada pela temperatura exterior.



**Figura 33 – Fragmento do modelo para simulação da influência do contexto meteorológico no consumo de energia elétrica em arrefecimento.**

Na Figura 34 estão representados os estados globais possíveis do modelo de simulação, gerados pelo GARP3. Cada estado representa uma iteração da simulação, apresentando a situação, a nível de quantidades e de influências sobre quantidades, para todas as entidades consideradas. São assim apresentadas as quantidades das várias entidades para o respetivo estado e a influência existente que ditará o estado seguinte (“?” em caso de incógnita). No mapa onde se encontra assinalado o primeiro estado observa-se que o modelo é iniciado com as quantidades especificadas no cenário (temperatura exterior com valor máximo e quantidade de energia consumida nula).



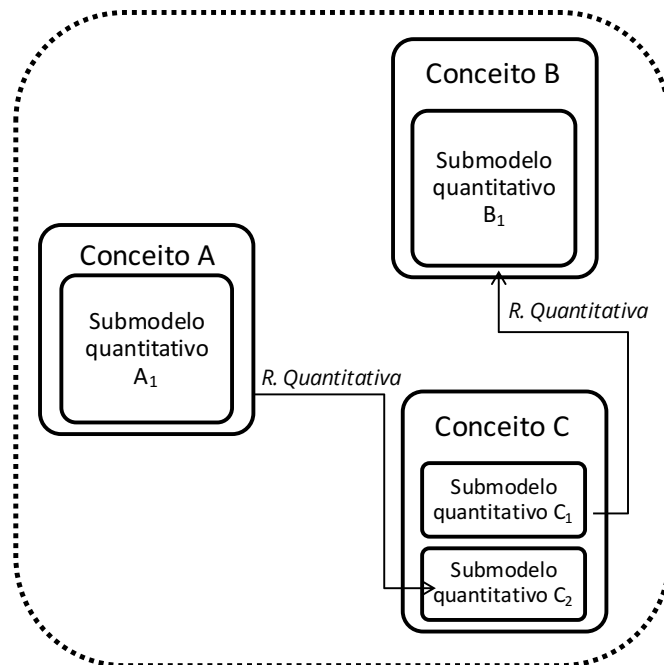
**Figura 34 – Estados (estado 1 e 3) do fragmento de modelo para simulação da influência do contexto meteorológico no consumo de energia elétrica para o sistema de arrefecimento.**

Na Figura 34 é também apresentado um exemplo de estado subsequente, neste caso o último estado possível (estado 3), onde se verifica que a quantidade de energia consumida incrementou para a unidade qualitativa “Max”, decorrente da influência positiva da temperatura exterior.

### 3.4.5. Modelização quantitativa

O passo final da metodologia de instanciação do modelo conceptual consiste na modelização quantitativa do sistema ou subsistema a modelizar, utilizando como base, instâncias qualitativas desenvolvidas previamente. A instanciação consistirá na caracterização quantitativa dos cenários e dos fragmentos de modelo qualitativos definidos na modelização qualitativa. Este passo é crucial para a caracterização de modelos de simulação que permitam modelizar o comportamento de um determinado sistema, em termos quantitativos, e que venham a servir de suporte a processos de decisão no âmbito da gestão energética em edifícios.

À semelhança da abordagem de modelização qualitativa é assumida, também, uma abordagem de submodelização. Como representado na Figura 35, a instância quantitativa é composta por um conjunto de submodelos (que instanciam quantitativamente os fragmentos de modelo qualitativos) organizados por blocos de conceitos.



**Figura 35 - Instanciação quantitativa.**

Os fragmentos de modelo e as suas relações podem ser modelizadas, quantitativamente, através de métodos matemáticos convencionais (recorrendo por exemplo, a álgebra linear ou cálculo diferencial). Os métodos matemáticos convencionais permitem modelizar um sistema com comportamento conhecido através da observação de fenómenos físicos. Contudo, para sistemas cujo comportamento é demasiado complexo será adequado o uso de metodologias de aprendizagem de modelos (por exemplo, algoritmos de *machine learning*), em que o processo de aprendizagem do modelo passará pela utilização de conjuntos de dados (*data sets*), para treino, e chegar a uma hipótese adequada.



## Capítulo 4

# Aplicações do modelo conceptual

### 4.1. Descrição do cenário de modelização

Neste capítulo é feita a validação do modelo conceptual e da abordagem de modelização proposta. É importante considerar-se um cenário para aplicação e validação, que seja composto por múltiplos sistemas com impacto significativo no balanço energético desse mesmo cenário.

Dada a impossibilidade de se utilizar um único edifício, que reúna um conjunto de sistemas modelizáveis com interesse para o objetivo de validação, foi considerado um cenário composto por dois edifícios reais. Em conjunto, estes dois edifícios incluem sistemas elucidativos das diferentes valências do modelo conceptual proposto. São estes o edifício do Departamento de Engenharia Eletrotécnica (DEE) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, situado no Monte da Caparica, e o edifício Fábrica dos Mirandas, em Coimbra.

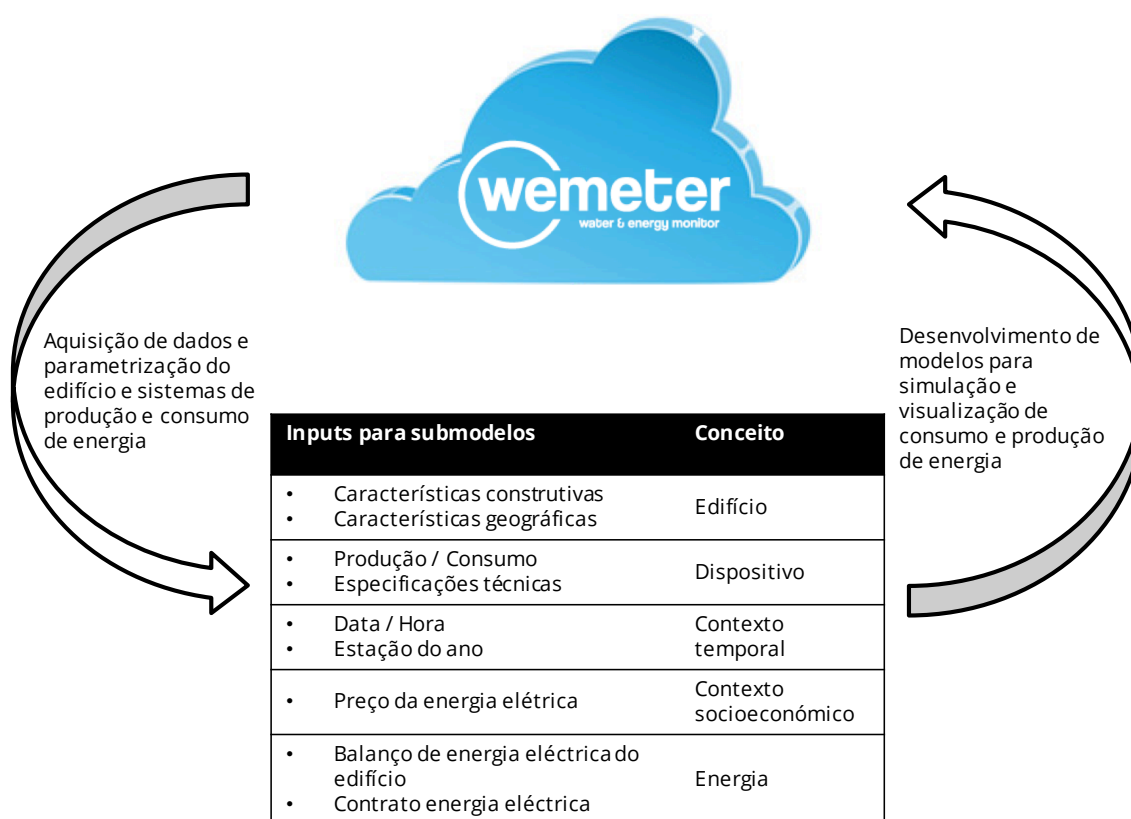
É, também, descrita uma plataforma desenvolvida para a monitorização de alguns dos sistemas considerados.

### 4.2. Sistema de monitorização de energia

No âmbito da aquisição de dados de consumo e produção de energia elétrica para a modelização quantitativa de sistemas em edifícios (descrita nas secções seguintes), foi desenvolvida uma plataforma para monitorização de consumos, denominada *Wemeter*. O desenvolvimento desta plataforma surge da necessidade de monitorização de consumo e produção de energia elétrica, com o objetivo de construção de históricos de dados, para um sistema de aproveitamento solar fotovoltaico (produção de energia elétrica) e para o Quadro Geral de Baixa Tensão de um edifício (QDBT). Estes sistemas encontram-se instalados no DEE, assim como a plataforma de monitorização em questão. A aquisição de dados de consumo e produção de energia elétrica, para construção de históricos, surge, nesta tese, como uma peça fundamental no de-

envolvimento de modelos de simulação quantitativos, para efeitos de validação do modelo conceptual e da abordagem de modelização propostos.

Como é descrito na Figura 36, o *Wemeter* (ferramenta que neste momento é escalonável para outro tipo de instalações) posiciona-se, no processo de modelização, como uma ferramenta que está na base da descrição de modelos, em sistemas de consumo e produção de energia em edifícios, e que estabelece uma ponte entre esta descrição e o desenvolvimento de modelos de simulação quantitativos destes sistemas. O *Wemeter* é responsável pela aquisição de dados, construção de históricos, visualização de consumos e cálculo de custos ao longo do tempo e, ainda, pela parametrização de edifícios e seus sistemas de produção e consumo de energia.



**Figura 36 – Posicionamento do *Wemeter* no processo de modelização.**

O *Wemeter* permite especificar, monitorizar e analisar informação, que se enquadra em alguns dos conceitos do modelo conceptual apresentado na Secção 3.3, nomeadamente:

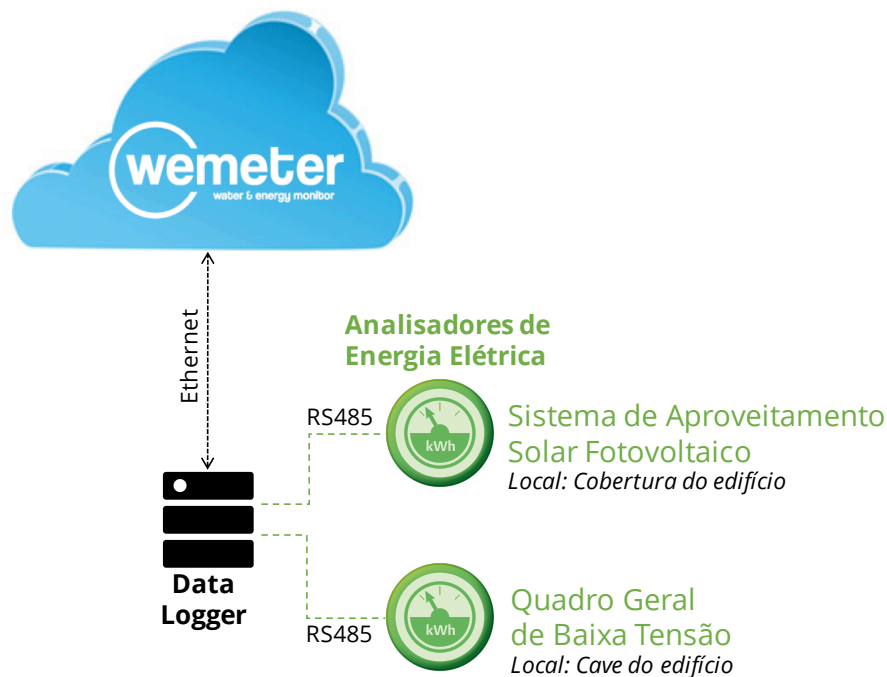
- Edifício, com a especificação de características construtivas e geográficas, tais como áreas, zonas e localização do edifício, importantes para definir o local do QGBT e do sistema de aproveitamento solar fotovoltaico;

- Dispositivo, com as especificações técnicas do QGBT e do sistema de aproveitamento solar fotovoltaico, assim como dos respetivos analisadores de energia. Para cada sistema de produção e consumo de energia, é feito o registo da quantidade de energia elétrica contabilizada pelo respetivo analisador de energia;
- Contexto temporal, através da contextualização dos consumos relativamente à data, hora, dia da semana e estação do ano;
- Contexto socioeconómico, através da especificação do preço da energia, para cálculo de custos;
- Energia, com a análise do balanço energético total do edifício decorrente do consumo do QGBT e da produção do sistema de aproveitamento solar fotovoltaico.

A arquitetura do *Wemeter* consiste na combinação de dois componentes complementares: a) um sistema de monitorização de leituras; e b) uma aplicação *Web*. O sistema de monitorização de leituras é constituído por contadores de energia, acoplados ao sistema de aproveitamento solar fotovoltaico e ao QGBT, que comunicam e transmitem os seus consumos utilizando protocolos *standard* e abertos (por exemplo, RS485 MODBUS). O sistema de monitorização pode ser analisado em maior pormenor em [97]. Após as leituras de energia elétrica serem recolhidas a partir de um *data logger* (computador com rotina em *Java* que trata da aquisição das leituras de consumo), são enquadradas num contexto temporal (data e hora) e, posteriormente, são enviadas para um servidor *Web*. Este sistema de monitorização de leituras encontra-se conceptualmente representado na Figura 37. Os seus componentes e infraestrutura são descritos, em maior pormenor, nas Secções 4.4.1 e 4.5.1.

A aplicação *Web* recebe e trata as leituras enviadas pelo sistema de aquisição de leituras, atribuindo-lhes: um dia da semana e uma estação do ano, com base no contexto temporal; um custo, com base no contexto socioeconómico (preço da energia elétrica); um contador, com base na rede e especificação de dispositivos configurados; uma localização, com base nas características construtivas do edifício; e um consumo ou produção de energia, com base nas características do dispositivo especificado. A partir das leituras recebidas, a aplicação *Web* calcula o balanço energético do edifício, relativamente a energia elétrica.

Estes dados de consumo e custo ficam disponíveis para visualização, através do *Graphic User Interface* (GUI) do *Wemeter*. A aplicação *Web* foi desenvolvida em *Javascript* (*frontend*) e *Python* (*backend*) e para alojamento foi usada a plataforma *Heroku*.

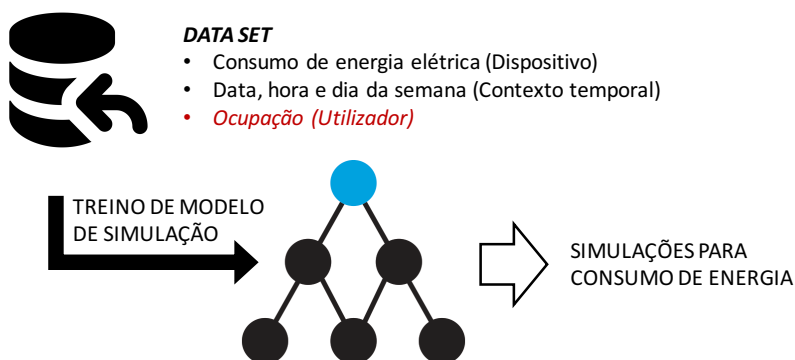


**Figura 37 – Arquitetura do sistema de monitorização de energia elétrica *Wemeter*.**

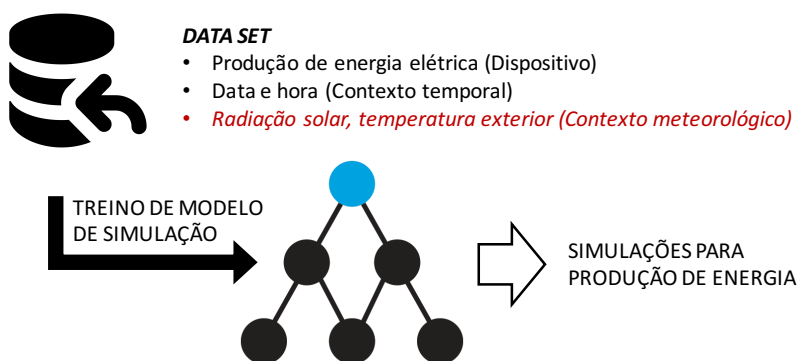
Os históricos de consumo e produção de energia, construídos pelo *Wemeter*, são utilizados, nesta tese, para o treino de modelos de simulação, em particular para os modelos seguintes:

- Modelo do consumo elétrico registado no QGBT do edifício do DEE, com base em históricos de consumos com informação relativa ao conceito de dispositivo (consumo de energia elétrica), ao conceito de contexto temporal (hora, data e dia da semana) e ao conceito de utilizador (ocupação). Neste modelo, a ocupação não é recolhida a partir do *Wemeter*;
- Modelo de produção de energia elétrica registada no sistema de aproveitamento solar fotovoltaico do edifício do DEE, tendo como base históricos de produção de energia com informação relativa ao conceito de dispositivo (produção de energia elétrica), ao conceito de contexto temporal (hora e data) e ao conceito de contexto meteorológico (temperatura e humidade externas). Neste modelo, a temperatura e humidade externas não são recolhidas pelo *Wemeter*.

Os processos de treino destes modelos, representados na Figura 38 e na Figura 39, encontram-se descritos, em mais pormenor, nas Secções 4.5.6.2 e 4.4.5.1.



**Figura 38 – Utilização do *Wemeter* para o treino de modelos de simulação de consumo de energia elétrica.**



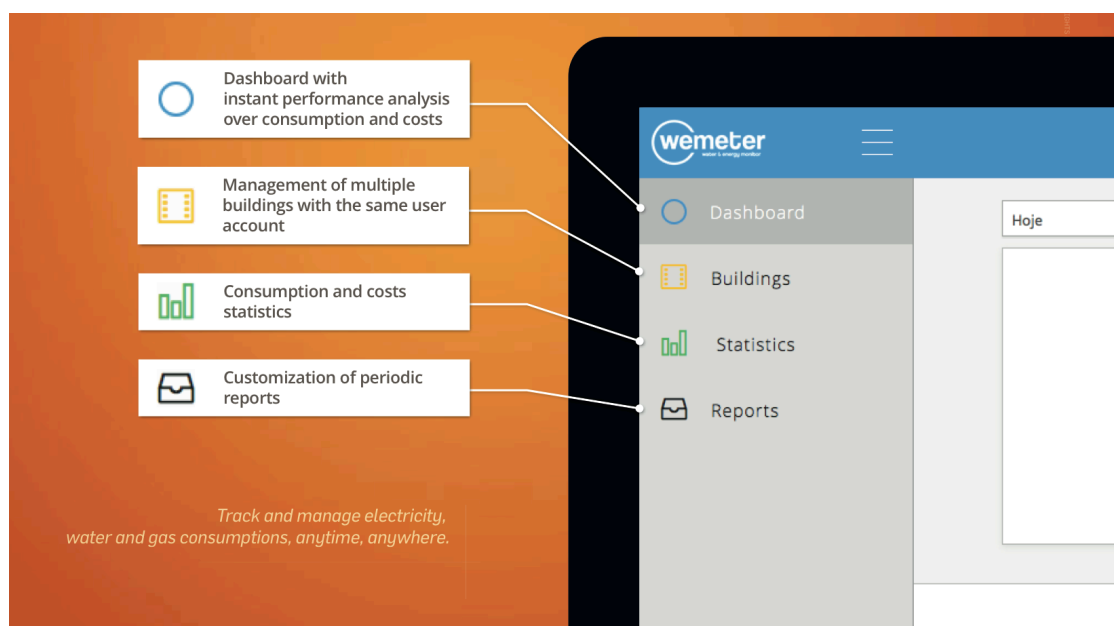
**Figura 39 – Utilização do *Wemeter* para o treino de modelos de simulação de produção de energia elétrica.**

Adicionalmente às características já descritas do *Wemeter*, necessárias para a aquisição e construção de históricos de leituras, de produção e consumo de energia elétrica, foram desenvolvidas algumas outras funcionalidades, que facilitam e potenciam a utilização do *Wemeter*. Foi desenvolvido um *dashboard* que permite visualizar o desempenho do edifício em termos de consumos, comparativamente, com períodos homólogos (Figura 40 e Figura 41). Foram implementados menus para parametrização do edifício, que permitem definir a rede de contadores de energia elétrica, água e gás, a distribuição destes contadores por diferentes zonas do edifício e associando-os a diferentes tipos de equipamentos (por exemplo, AVAC ou Iluminação). Desta forma os consumos podem ser desagregados por contador, sector e tipo de utilização de equipamentos. O utilizador pode parametrizar, ainda, os contratos dos distribuidores de eletricidade, de água e de gás e as respetivas diferentes tarifas. Esta informação é essencial para a apresentação de custos ao longo do tempo.



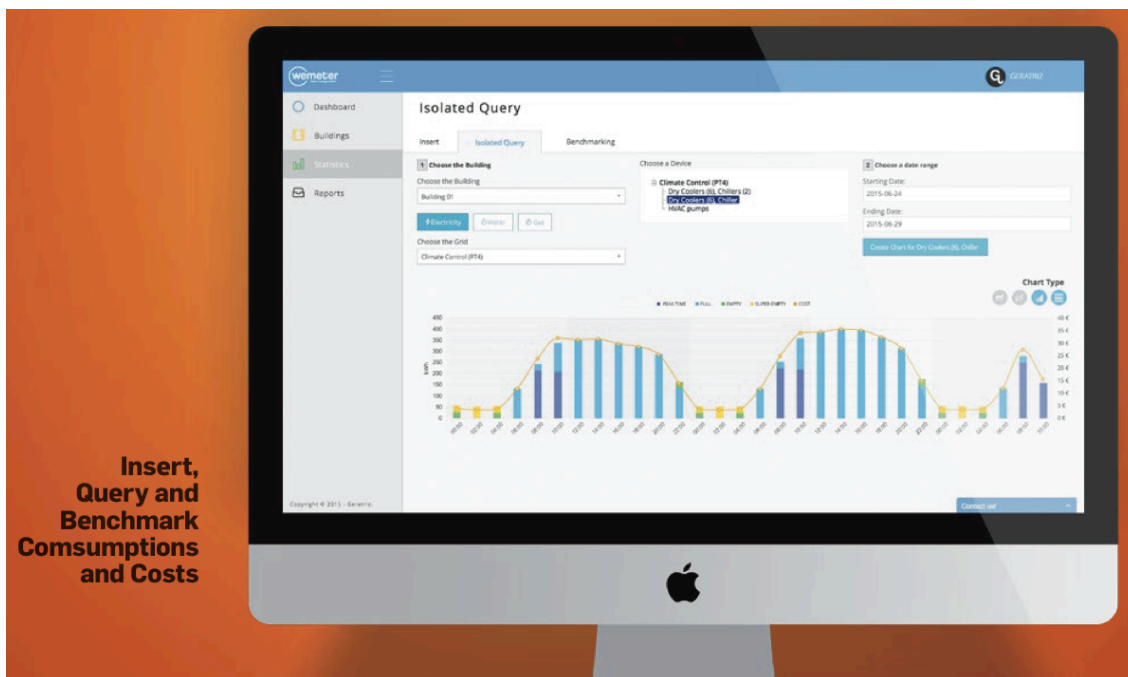
**Get immediate insight  
about all utilities**

**Figura 40 – Dashboard do Wemeter, com indicadores e gráficos sobre o desempenho do edifício em termos de utilização de energia elétrica, água e gás.**



**Figura 41 – Principais funcionalidades do Wemeter.**

Foi ainda desenvolvida uma secção de relatórios, que permite consultar e parametrizar diferentes gráficos e análises estatísticas sobre consumos e custos, ao longo do tempo, sendo possível exportar esta informação em formato .pdf (Figura 42).



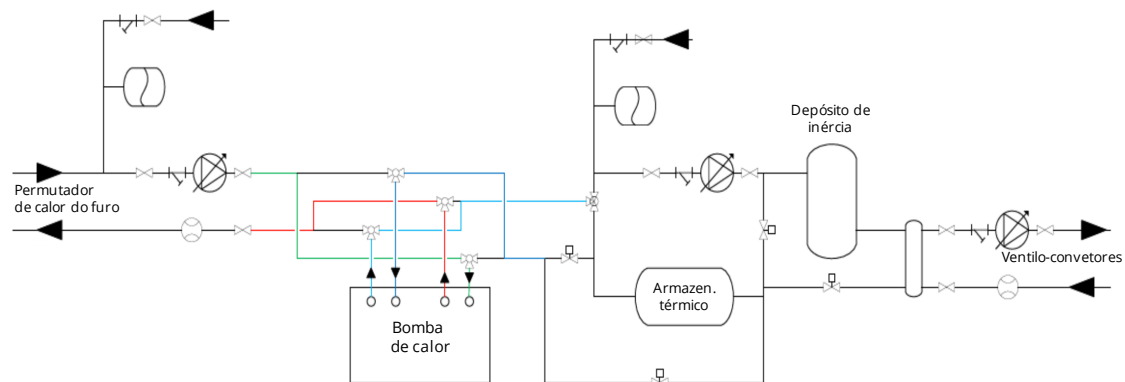
**Figura 42 – Visualização da utilização de energia elétrica, água e gás no edifício, desagregada por contadores e tipos de cargas.**

O sistema *Wemeter* está, atualmente, a ser implementado e validado em outros edifícios do tipo centro comercial e industrial.

### 4.3. Sistema de aproveitamento geotérmico com bomba de calor para climatização

#### 4.3.1. Caracterização do sistema

Para validar o modelo conceptual, assim como a abordagem de modelização proposta, num sistema de climatização real, e fazer a respetiva análise da relação do consumo do sistema de climatização com diferentes fatores que poderão influenciar o seu funcionamento, foi considerado um sistema de aproveitamento geotérmico para climatização, instalado no edifício Fábrica dos Mirandas, cujo esquema de princípio do sistema da bomba de calor se encontra representado na Figura 43. O sistema integra permutadores de calor que transferem calor de e para um furo, uma bomba de calor, um sistema de armazenamento térmico, um depósito de inércia e, ainda, ventilo-convetores responsáveis pela climatização do interior do edifício. Na Figura 44 é possível ver a instalação real do sistema.



**Figura 43 – Esquema da bomba de calor do edifício Fábrica dos Mirandas.**



**Figura 44 – Instalação da bomba de calor do edifício Fábrica dos Mirandas.**

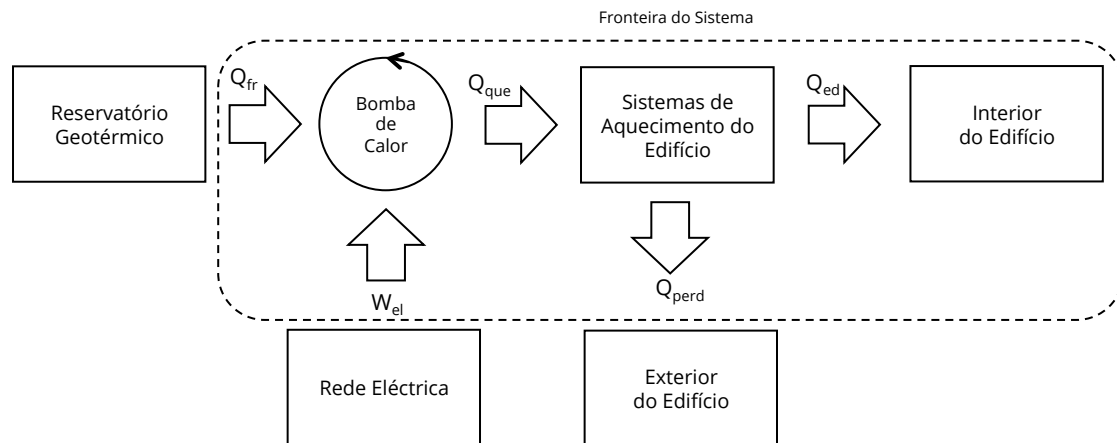
O sistema é monitorizado em termos de temperaturas (entre outras, a temperatura do reservatório geotérmico e do interior do edifício), caudais de água quente e fria, e consumos de energia, através de sensores de temperatura, contadores com emissão de impulsos, analisadores de energia, PLCs para comunicação e um sistema de monitorização em tempo real.

O balanço energético do sistema de climatização, que está representado no diagrama da Figura 45, consiste na transferência de calor do reservatório geotérmico para o interior do edifício (configuração de aquecimento), através de uma bomba de calor alimentada com energia elétrica. O calor transferido do reservatório geotérmico para as instalações do edifício, depende da temperatura a que se encontra o reservatório e da energia elétrica utilizada para alimentar a bomba de calor [98]. O calor transferido pela bomba de calor é distribuído pelo edifício, através dos sistemas de aquecimento e ventilação do edifício (por exemplo, ventilo-convetores). Parte deste calor é transferido para o exterior do edifício sob a forma de perdas.



Num sistema configurado para aquecimento, estabelece-se que a relação entre o calor produzido pela bomba de calor ( $Q_{que}$ ), o calor utilizado e retirado do reservatório ( $Q_{fr}$ ) e a energia elétrica utilizada, representada sob a forma de trabalho ( $W_{el}$ ) na Figura 45, é dada por:

$$Q_{que} = Q_{fr} + W_{el},$$



**Figura 45 - Balanço energético da bomba de calor.**

Dada a relação entre a energia elétrica consumida e o calor extraído do reservatório, e visto que a quantidade de calor extraído do reservatório depende da temperatura desse mesmo reservatório, considera-se que a temperatura do reservatório é uma variável importante para a modelização do consumo elétrico do sistema. A utilização do sistema de climatização também depende da temperatura exterior (que tem impacto no conforto dos ocupantes do edifício), e do número de ocupantes no edifício (que está relacionado com o dia da semana e a hora do dia).

#### 4.3.2. Descrição do submodelo

O sistema descrito é modelizável, através de um submodelo que relaciona o consumo de energia elétrica, em função do contexto temporal, meteorológico e geológico, como representado na Figura 46. Na Secção 4.3.3 são descritas, com mais pormenor, as influências destes conceitos no consumo de energia elétrica do sistema de climatização. O sistema também produz energia térmica, contudo, para efeitos de clareza e simplificação do modelo, a energia térmica não será analisada neste caso de estudo.



**Figura 46 - Submodelo da bomba de calor.**

Como descrito no Capítulo 3.4.3, e de acordo com as considerações feitas sobre o sistema de climatização, na Secção 4.3.1, o submodelo pode ser especificado segundo um conjunto de *entradas* ( $e_i$ ), *saídas* ( $s_i$ ), *suposições* ( $su_i$ ), *elementos* ( $el_i$ ) e *relações* entre *entradas* e *saídas* ( $\{r_i\} = \{e_i \rightarrow s_j\}$ ). Para este submodelo foram consideradas como *entradas* as condições climáticas, o dia e hora e as condições geotérmicas. Como *suposições*, considerou-se a existência de um reservatório geotérmico. Como *elementos* do sistema, consideraram-se o reservatório geotérmico e a bomba de calor. Especificaram-se, ainda, a existência de relações entre o consumo elétrico e as condições climáticas, as geotérmicas e o dia e hora.

$$\left\{ \begin{array}{l} \{e_1\} = \{\text{condições climáticas (Contexto Meteorológico), dia e hora (Contexto Temporal),} \\ \quad \text{condições geotérmicas (Contexto Geotérmico)}\} \\ \{s_1\} = \{\text{consumo eléctrico (Dispositivo)}\} \\ \{su_1\} = \{\text{Reservatório geotérmico} \in c. \text{estruturais (Edifício)}\} \\ \{el_1, el_2\} = \{\text{Reservatório geotérmico (Edifício), bomba de calor (Dispositivo)}\} \\ \{r_1, r_2, r_3\} = \{\text{condições climáticas (Contexto Meteorológico)} \rightarrow \text{consumo eléctrico (Dispositivo)}, \\ \quad \text{condições geotérmicas (Contexto Geotérmico)} \rightarrow \text{consumo eléctrico (Dispositivo)}, \\ \quad \text{dia e hora (Contexto Temporal)} \rightarrow \text{consumo eléctrico (Dispositivo)}\} \end{array} \right.$$

### 4.3.3. Instâncias qualitativas do modelo conceptual

A partir da abordagem de modelização composicional descrita na secção anterior, define-se a seguinte *query* para o sistema de aproveitamento geotérmico com bomba de calor para climatização:

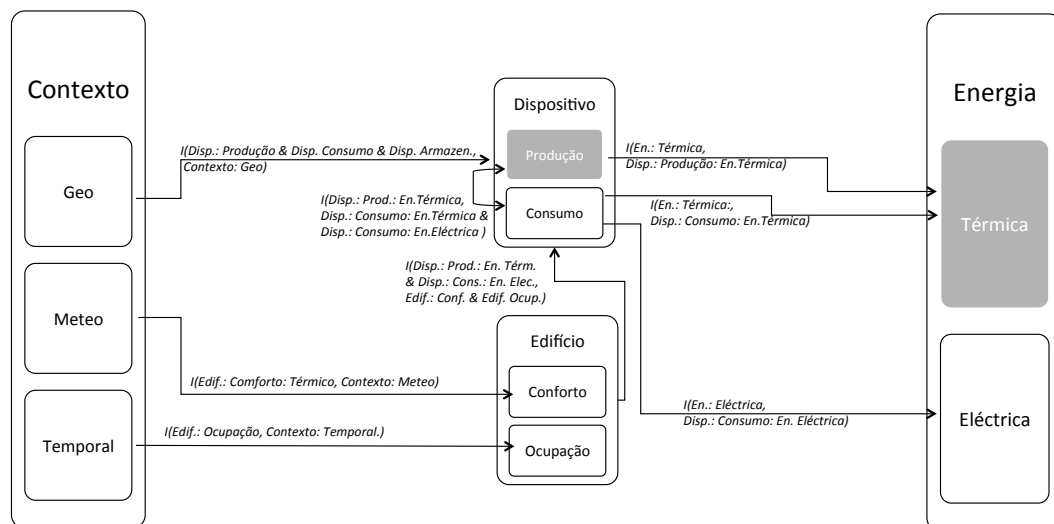
*“Qual o efeito das condições geotérmicas, climáticas e do contexto temporal no consumo de energia eléctrica do sistema de climatização geotérmico de um edifício?”*

O cenário considerado consiste num sistema de climatização geotérmico, com operação e consequente consumo eléctrico condicionados por:

- Afluência, comportamento e conforto dos visitantes do edifício;
- Condições térmicas do reservatório geotérmico;
- Condições climáticas envolventes;
- Contexto temporal.

Para este cenário e subsequente *query* define-se a teoria de domínio representada no diagrama da Figura 47, onde estão representadas, também, as relações definidas no modelo conceptual (Secção 3.3.2) para os conceitos considerados relevantes para o sistema em questão.

Para representar as relações de influência entre conceitos, apresentadas nesta figura e nas próximas figuras subsequentes, convencionou-se que a influência de um *conceito A* em um *conceito B* é representada pela expressão  $I(\text{conceito}B, \text{conceito}A)$ .



**Figura 47 – Teoria de domínio da instância qualitativa do sistema da bomba de calor.**

Convencionou-se, também, que as relações de influência podem ser definidas como: a) relações diretas, quando um conceito *A* influencia um conceito *B*, sem intermédio de um conceito *C* (como por exemplo, a relação de influência entre o contexto meteorológico e o conforto do edifício); e b) relações indiretas, quando um conceito *A* influencia um conceito *B* por intermédio de um conceito *C* (como por exemplo, a relação de influência entre o contexto temporal e o consumo do dispositivo, por intermédio do conforto do edifício).

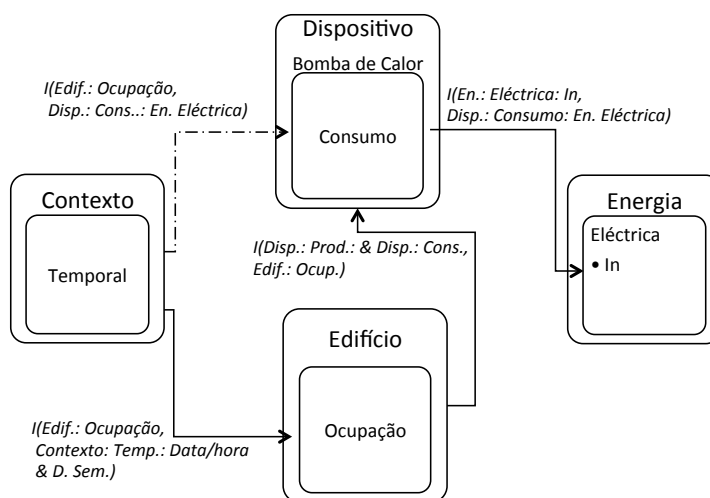
Para o caso de aplicação da bomba de calor, as condições climatéricas exteriores ao edifício influenciam diretamente a temperatura e a humidade internas do edifício. Por sua vez, o conjunto do conforto térmico e a ocupação tem influência no funcionamento de dispositivos de climatização, consumidores de energia eléctrica e produtores de energia térmica, necessários para manter níveis de conforto aceitáveis. A utilização destes dispositivos influencia, diretamente, a energia eléctrica e térmica que entra e sai ou que é armazenada no sistema. Como foi visto, em sistemas de climatização, com aproveitamento de energia geotérmica, o contexto geotérmico é, também, um fator relevante no consumo de energia eléctrica por parte destes dispositivos.

Desta forma identificam-se, também, possíveis relações indiretas entre os contextos geotérmico (por exemplo temperatura do reservatório geotérmico), meteorológico (por exemplo, temperatura e humidade exteriores) e temporal (por exemplo estação do ano) e a energia eléctrica utilizada pelo sistema, a serem analisadas mais à frente. O sistema a modelizar pode ser dividido em três submodelos distintos, mas complementares, analisados separadamente. Tanto as

relações diretas (linhas contínuas), como indiretas (linhas a tracejado) descritas são analisadas e pormenorizadas nas respetivas instâncias qualitativas do submodelo.

#### 4.3.3.1. Influência do contexto temporal no consumo de energia elétrica

O número de ocupantes do edifício apresenta uma forte relação com o contexto temporal. A hora do dia, o dia da semana, o mês e estação do ano determinam horários, hábitos e compromissos dos utilizadores do edifício, que afetam, diretamente, a sua presença nas instalações do edifício (Secção 2.1.2). Desta forma, existe uma relação direta entre o tempo e a ocupação do edifício. Por sua vez, o número de ocupantes determina a utilização de dispositivos e sistemas do edifício, existindo um impacto direto na utilização da bomba de calor e consequente consumo elétrico. Existe, assim, uma relação indireta (a tracejado) entre o contexto temporal e a energia elétrica que entra no sistema a partir do consumo elétrico da bomba de calor, através do impacto do contexto temporal na ocupação do edifício, e do efeito desta ocupação no consumo de energia em climatização. Convencionou-se que a energia elétrica consumida pelo sistema é energia proveniente do distribuidor e entra no sistema e que a energia produzida pelo sistema é energia fornecida ao distribuidor e que sai do sistema (Figura 48).

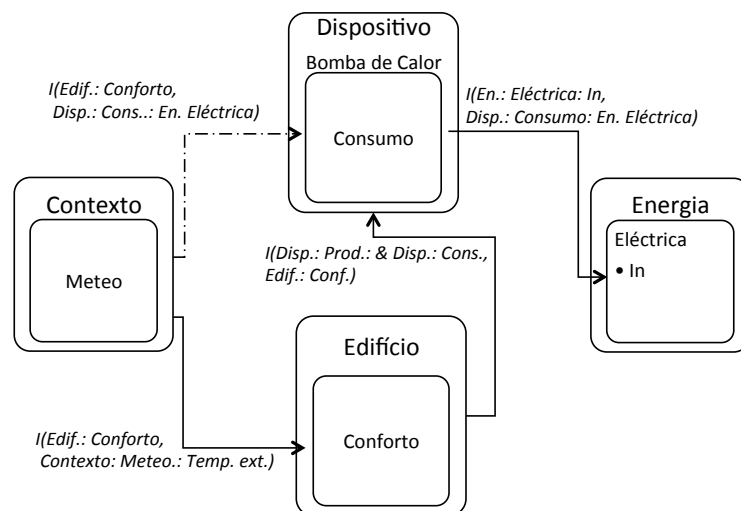


**Figura 48 - Influência do contexto temporal no consumo de energia elétrica para a instância qualitativa da bomba de calor.**

#### 4.3.3.2. Influência do contexto meteorológico no consumo de energia elétrica

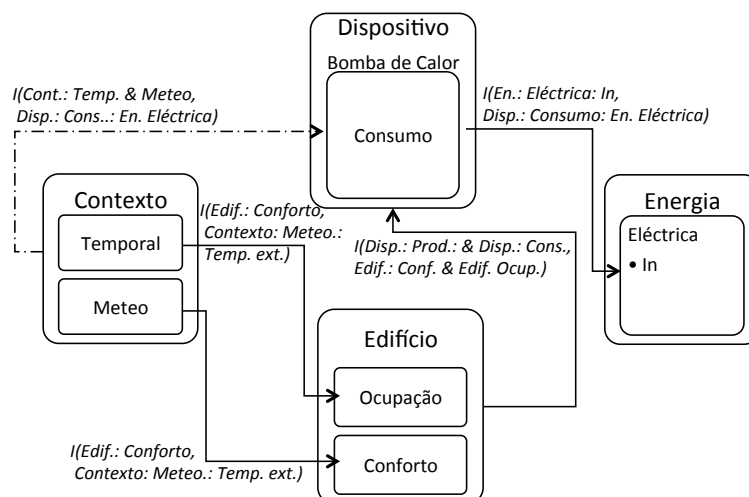
As condições atmosféricas ou contexto meteorológico externo ao edifício, tais como humidade e temperatura, têm um impacto na temperatura e humidade internas do edifício (Secção 2.1.3.1). Parte deste impacto é atenuado pelas características construtivas do edifício. Existe, claramente, uma relação direta entre as condições atmosféricas e o conforto do edifício, sendo o conforto térmico sentido pelos ocupantes do edifício a determinar os requisitos de utilização

de sistemas de climatização para manutenção de níveis aceitáveis de conforto, pelo que este tem, também, um impacto direto sobre a utilização da bomba de calor e consequente consumo elétrico. Características como temperatura e humidade externas influenciam a utilização de sistemas que consomem energia elétrica para efeitos de climatização do edifício. O contexto meteorológico influencia indiretamente a energia elétrica que entra no sistema (Figura 49).



**Figura 49 - Influência do contexto meteorológico no consumo de energia elétrica para a instância qualitativa da bomba de calor.**

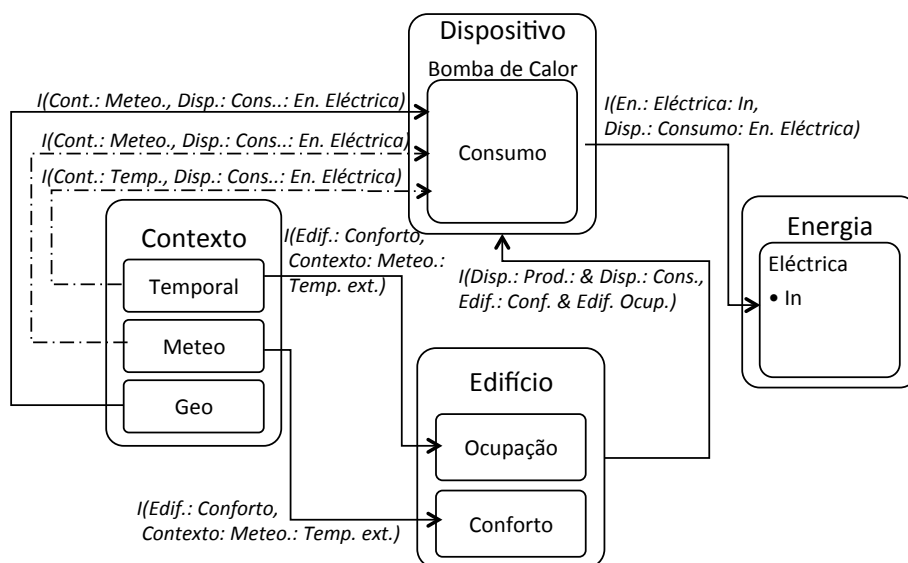
Este subsistema é complementar ao da influência do contexto meteorológico no consumo do edifício. Ambos podem ser conjugados para uma modelização mais precisa do consumo elétrico do sistema (Figura 50).



**Figura 50 - Influência do contexto temporal e meteorológico no consumo de energia elétrica para a instância qualitativa da bomba de calor.**

#### 4.3.3.3. Influência do contexto geológico no consumo de energia elétrica

Por último, o contexto geológico, tal como a temperatura do reservatório geotérmico, determina as necessidades, em termos de consumo de energia elétrica, para produção de uma determinada quantidade de energia térmica (Secção 2.1.4). Existe uma relação direta entre o consumo elétrico da bomba de calor e as condições geotérmicas do reservatório. Este último subsistema foi integrado na instância anterior, tal como o representado na Figura 51.

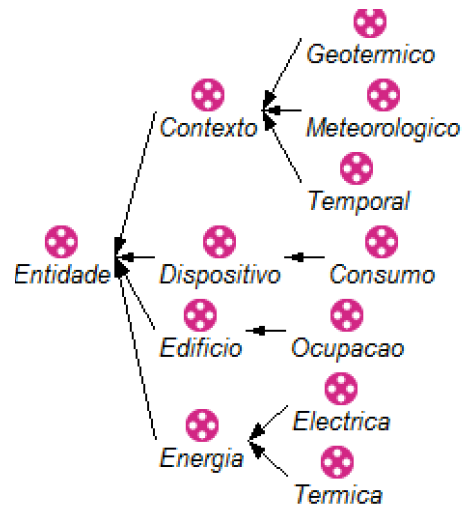


**Figura 51 - Influência do contexto temporal, meteorológico e geológico no consumo de energia elétrica para a instância qualitativa da bomba de calor.**

#### 4.3.4. Modelos de simulação qualitativos

Para o desenvolvimento de modelos de simulação qualitativos, para as referidas instâncias, foi utilizada a abordagem de modelização composicional descrita na Secção 3.4.4. Consideraram-se, como entidades, alguns dos conceitos abstratos, que fazem parte da teoria de domínio descrita no Capítulo 3.4.4.2, e que são necessárias à construção de modelos de simulação qualitativos para os submodelos da Figura 51, nomeadamente, o contexto (geotérmico, meteorológico e temporal), o dispositivo de consumo, a ocupação do edifício e, por último, a energia elétrica e térmica. Esta última é referida, mas, por motivos de simplificação do modelo, não será utilizada no restante documento. Estas entidades estão representadas na Figura 52.

São estas as entidades a utilizar na especificação do cenário do modelo e nos fragmentos de modelo.



**Figura 52 - Entidades dos fragmentos do modelo de simulação qualitativo para a bomba de calor.**

Como espaços qualitativos consideraram-se os dias da semana (contexto temporal), a ocupação (ocupação do edifício), a temperatura do reservatório (contexto geotérmico), a temperatura exterior (contexto meteorológico), a quantidade de energia (consumo do dispositivo) e o balanço de entrada de energia elétrica:

- Dias da semana, com a quantidade “Dias” e com valores “Semana”, “Fimdesemana” e “Zero”;
- Ocupação e quantidade de energia, com a quantidade “Mpm” e com valores “Max”, “Min”, “Zero”;
- Temperatura do reservatório e temperatura exterior, com a quantidade “Mzm” e com valores “Max”, “Zero” e “Min”;
- Balanco in, com a quantidade “Balanco in” e com valores “Mais e “Zero”.

O cenário do modelo, representado na Figura 53, especifica o estado inicial considerado para o sistema, os intervalos quantitativos e, ainda, as configurações com algumas relações entre entidades. É sobre o cenário definido que os modelos de fragmento são simulados e as suas quantidades atualizadas a cada iteração.

Como condições iniciais do cenário (marcadores azuis na figura) especificou-se que o sistema se encontra a operar durante a semana, com a temperatura mínima do reservatório geotérmico e com a temperatura exterior mínima. Não existindo tendências de incremento ou decremento de quantidades ( $\delta$ ) parametrizadas em nenhuma das entidades, os valores qualitativos ficam apenas dependentes das condições iniciais parametrizadas e das relações de influência dos fragmentos de modelo, descritos mais à frente.

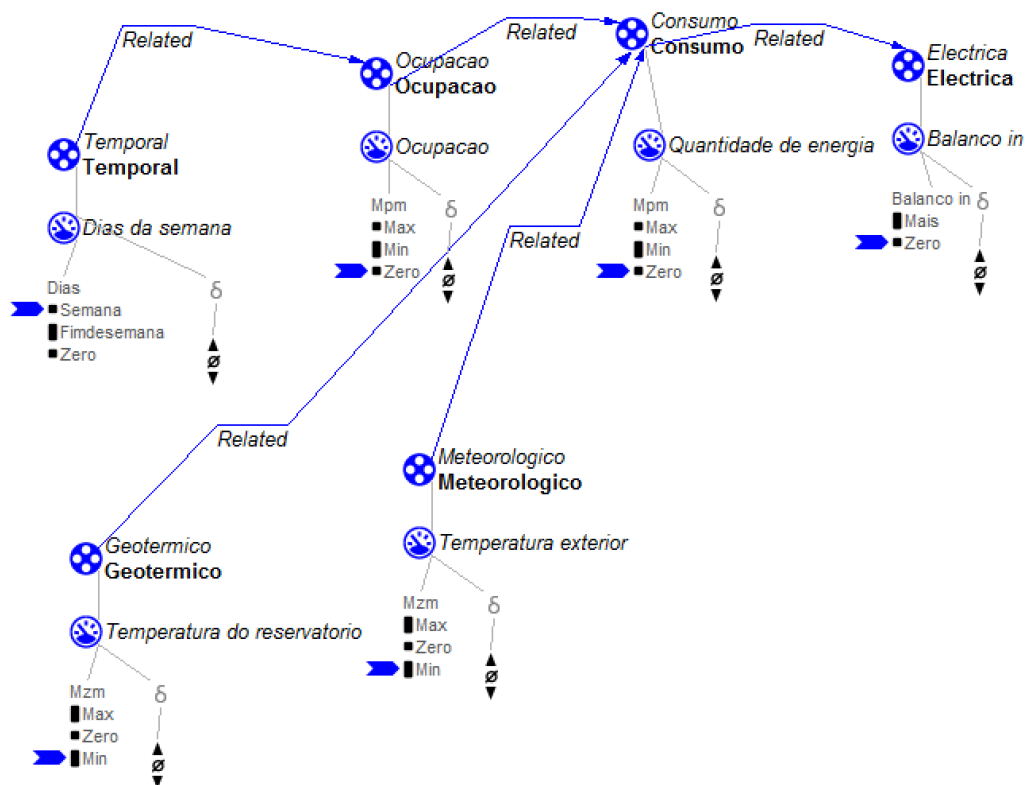


Figura 53 – Cenário do modelo de simulação qualitativo para a bomba de calor.

As configurações (relações entre entidades) definem as relações entre entidades existentes no respetivo cenário e que são um requisito para que um modelo de fragmento seja aplicável a esse cenário. Para este cenário foram especificadas as configurações seguintes:

- Temporal e Ocupação;
- Ocupação e Consumo;
- Geotérmico e Consumo;
- Meteorológico e Consumo;
- Consumo e Elétrica.

De forma a simular, qualitativamente, as instâncias do modelo conceptual definidas, anteriormente, (influências dos contextos meteorológico, temporal e geológico no consumo de energia em aquecimento), foram construídos os fragmentos do modelo de simulação seguintes:

- Influência do tempo no consumo de energia elétrica em aquecimento;
- Influência das condições climáticas no consumo de energia elétrica em aquecimento;
- Influência das condições geotérmicas no consumo de energia elétrica em aquecimento.



De seguida é feita uma descrição de cada um destes fragmentos de modelo, assim como dos seus resultados de simulação no cenário especificado.

#### 4.3.4.1. Influência do contexto temporal no consumo de energia elétrica em aquecimento

O presente fragmento do modelo de simulação pretende modelizar, qualitativamente, o comportamento do balanço de energia elétrica do sistema, em função do consumo elétrico do dispositivo de climatização, da ocupação do edifício e do contexto temporal.

A especificação de fragmentos de modelo assenta nos mesmos elementos utilizados para a especificação de cenários, isto é, entidades, configurações e quantidades. Existem, contudo, algumas particularidades na especificação de fragmentos de modelo, nomeadamente:

- De forma a que o modelo de fragmento a desenvolver seja aplicável ao cenário em questão, o fragmento de modelo deverá ser coerente com o respetivo cenário em termos de entidades e relações entre entidades (configurações);
- Especificação de relações de dependência entre quantidades para modelizar o comportamento de cada entidade em termos qualitativos.

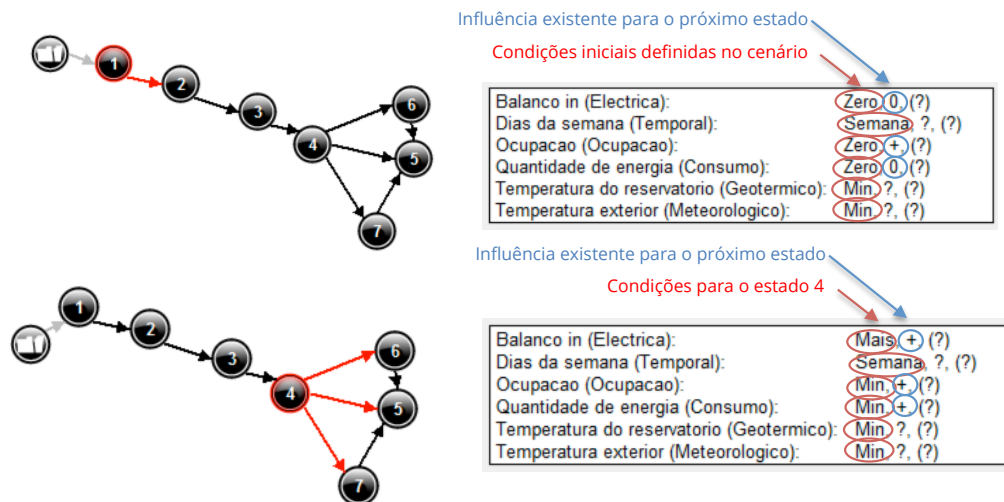
De acordo com a Figura 29 e como especificado na Figura 48, para se modelizar, qualitativamente, a influência do contexto temporal no consumo de energia elétrica em aquecimento devem ser considerados os fragmentos de modelo seguintes:

- Fragmento para modelização do contexto temporal, com a especificação das condições temporais do modelo qualitativo;
- Fragmento para modelização da ocupação do edifício, com a caracterização da influência do contexto temporal na ocupação do edifício;
- Fragmento para modelização do consumo do dispositivo de climatização, com a caracterização do comportamento do consumo do sistema de aquecimento em função da ocupação do edifício;
- Fragmento para modelização da energia elétrica, com a caracterização do balanço de energia elétrica do sistema.

Por questões de clareza e simplificação, optou-se por agrupar todos estes fragmentos simples de modelo num único fragmento designado “Influência do contexto temporal no consumo de energia elétrica em aquecimento”, composto pelas várias entidades e quantidades que seriam utilizadas em cada um dos fragmentos de modelo mais simples referidos, nomeadamente:

- Entidade Temporal, com o intervalo qualitativo Dias da semana;
- Entidade Ocupação, com o intervalo qualitativo Ocupação;





**Figura 55 – Estados (estado 1 e 4) do fragmento de modelo para simulação da influência do contexto temporal no consumo de energia elétrica para a bomba de calor.**

É dado um exemplo de estado subsequente, onde se verifica que tanto a ocupação como a quantidade de energia consumida e o balanço de energia elétrica incrementaram uma unidade qualitativa, decorrente de se tratar de um dia da semana.

As quantidades do dia da semana, temperatura do reservatório e temperatura exterior permanecem sempre com o mesmo valor por não existirem quaisquer influências diretas sobre as respetivas entidades.

#### 4.3.4.2. Influência do contexto meteorológico no consumo de energia elétrica em aquecimento

De forma semelhante ao fragmento de modelo especificado na Secção 4.3.4.1, pretende-se especificar um fragmento de modelo que retrate o comportamento do balanço de energia elétrica de entrada, em função da temperatura exterior e do consumo elétrico do sistema de climatização, no regime de aquecimento. Na Figura 56 parametrizou-se uma relação de influência negativa (I<sup>-</sup>) entre a temperatura exterior e a quantidade de energia consumida em aquecimento, já que as necessidades de aquecimento aumentam com o decréscimo da temperatura exterior.

Na Figura 57 é dado um exemplo de estado subsequente, dado pelo GARP3, onde se define que tanto a quantidade de energia consumida como o balanço de energia elétrica incrementaram uma unidade qualitativa, decorrente das condições iniciais de temperatura exterior mínima.

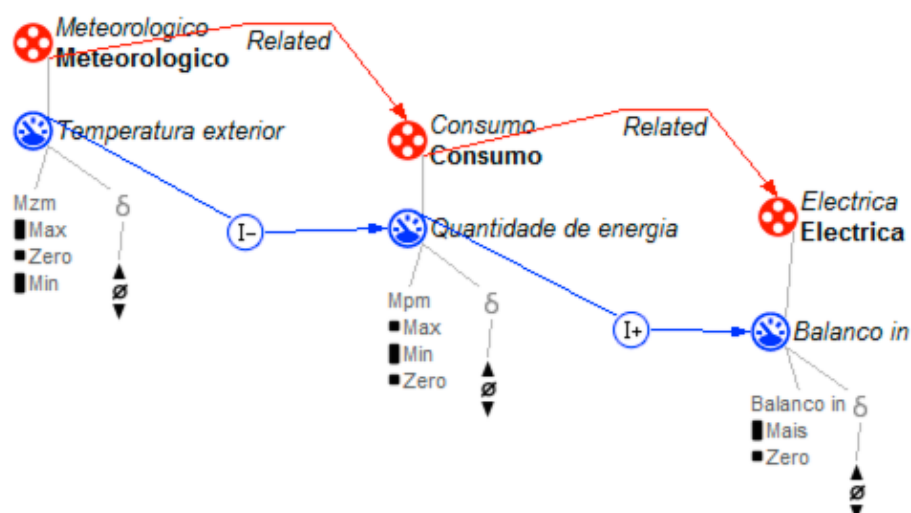


Figura 56 - Fragmento de modelo para simulação da influência do contexto meteorológico no consumo de energia elétrica para a bomba de calor.

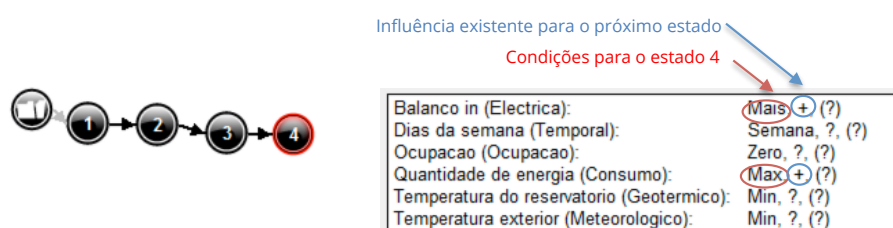


Figura 57 - Estados (estado 4) do fragmento de modelo para simulação da influência do contexto meteorológico no consumo de energia elétrica para a bomba de calor.

#### 4.3.4.3. Influência do contexto geológico no consumo de energia elétrica em aquecimento

Neste fragmento de modelo é especificado o comportamento do balanço de energia elétrica de entrada do sistema, em função da temperatura do reservatório geotérmico e do consumo elétrico do sistema de climatização, no regime de aquecimento. Foi especificada na Figura 58 uma relação de influência inversa entre a temperatura do reservatório geotérmico e a quantidade de energia consumida em aquecimento. Com temperaturas baixas no reservatório é necessário um maior consumo elétrico para se proceder ao aquecimento do edifício.

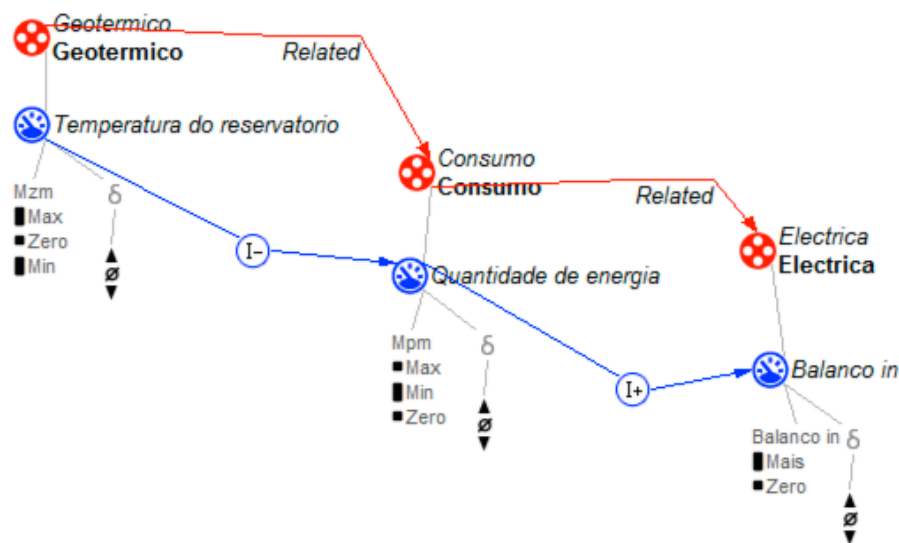


Figura 58 - Fragmento de modelo para simulação da influência do contexto geotérmico no consumo de energia elétrica para a bomba de calor.

Na Figura 59 é dado um exemplo de estado subsequente, onde se verifica que tanto a quantidade de energia consumida como o balanço de energia elétrica incrementaram uma unidade qualitativa, decorrente das condições iniciais de temperatura mínima do reservatório.

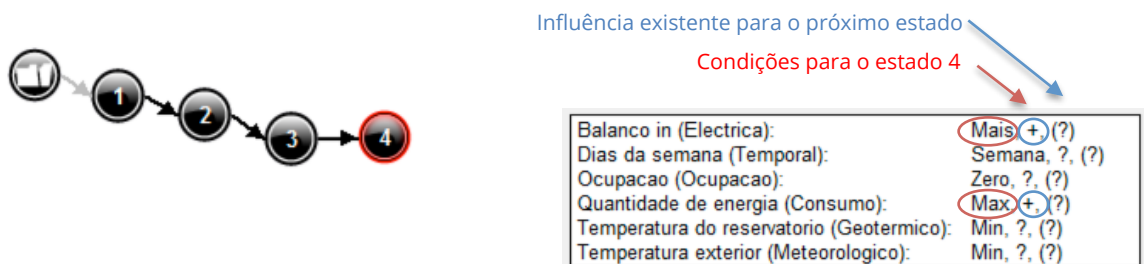


Figura 59 - Estados (estado 1 e 4) do fragmento de modelo para simulação da influência do contexto geotérmico no consumo de energia elétrica para a bomba de calor.

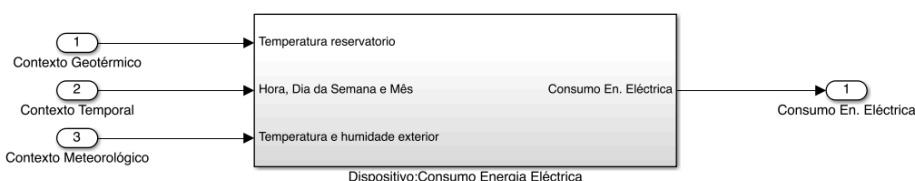
As instâncias qualitativas especificadas na Secção 4.3.3, em conjunto com os estudos realizados com os fragmentos de modelo qualitativos, permitem concretizar quais as entradas, as saídas e as relações entre conceitos que são relevantes para modelizar o consumo de energia elétrica para o sistema de aproveitamento geotérmico para climatização. Conclui-se que a informação relativa ao contexto meteorológico, temporal e geotérmico constituem entradas relevantes e com relações de influência sobre o consumo do sistema. A ocupação sobre o edifício também é relevante, apesar de poder ser parcialmente substituída pelo contexto temporal, assumindo-se que este será o maior motivador para o número de ocupantes no edifício em determinado momento. Estas considerações são relevantes para se conceber a instanciação

quantitativa do sistema, descrita na próxima secção. Este próximo passo consistirá em concretizar, quantitativamente, as considerações qualitativas descritas e referentes a variáveis de entrada, variáveis de saída, fatores e respetivas inter-relações relevantes que condicionam o consumo elétrico do sistema de aproveitamento geotérmico para climatização. A instanciação qualitativa revela-se como um passo que beneficia o processo de modelização ao nível do estudo preliminar sobre o comportamento de sistemas, providenciando estrutura, organização e coerência à fase seguinte de instanciação quantitativa.

#### 4.3.5. Instâncias quantitativas do modelo conceptual

Para se proceder à modelização quantitativa dos sistemas analisados neste trabalho, tendo em consideração os estudos qualitativos realizados, foi desenvolvida uma ferramenta para instanciação e simulação que instancia os fragmentos de modelos qualitativos em submodelos quantitativos. Desta maneira a abordagem de submodelização é potenciada ao desacoplar-se o submodelo original de todo o sistema de climatização em submodelos mais simples. A ferramenta desenvolvida tem por base *MATLAB/SIMULINK* e é constituída por vários blocos que representam os submodelos quantitativos para os vários sistemas e subsistemas. Em cada bloco são especificadas as entradas, saídas e o submodelo quantitativo que as relaciona. Este último pode englobar modelos matemáticos convencionais, com recurso, por exemplo, a equações diferenciais ou podem ser utilizadas técnicas de aprendizagem de modelos com base em algoritmos de *machine learning*. No caso em concreto deste e dos restantes sistemas modelizados no decorrer deste trabalho, dada a abundância de históricos de dados, não só referentes a consumo e produção de energia, como também referente às variáveis de entrada em análise, optou-se pela utilização de modelos com base em redes neuronais artificiais - *artificial neural networks* (ANNs).

Para o sistema do consumo elétrico do sistema de aproveitamento geotérmico para climatização em concreto simplificou-se o modelo do edifício, assumindo que este é constituído apenas pelo submodelo dispositivo (Bomba de Calor) representado na Figura 60. Desta forma as entradas do modelo do sistema consistem no contexto Temporal, Meteorológico e Geotérmico e como saída o Consumo de energia Elétrica do edifício.



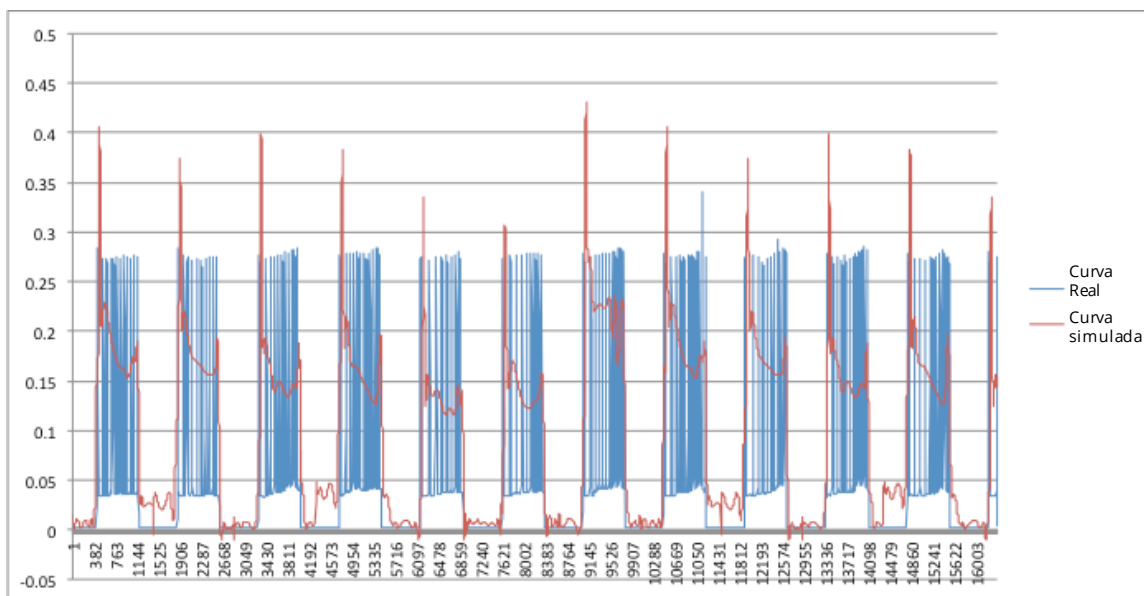
**Figura 60 - Bloco do submodelo quantitativo para o consumo elétrico da bomba de calor.**

De seguida são descritos cada um dos submodelos de simulação quantitativos para o sistema em questão, assim como os resultados obtidos.

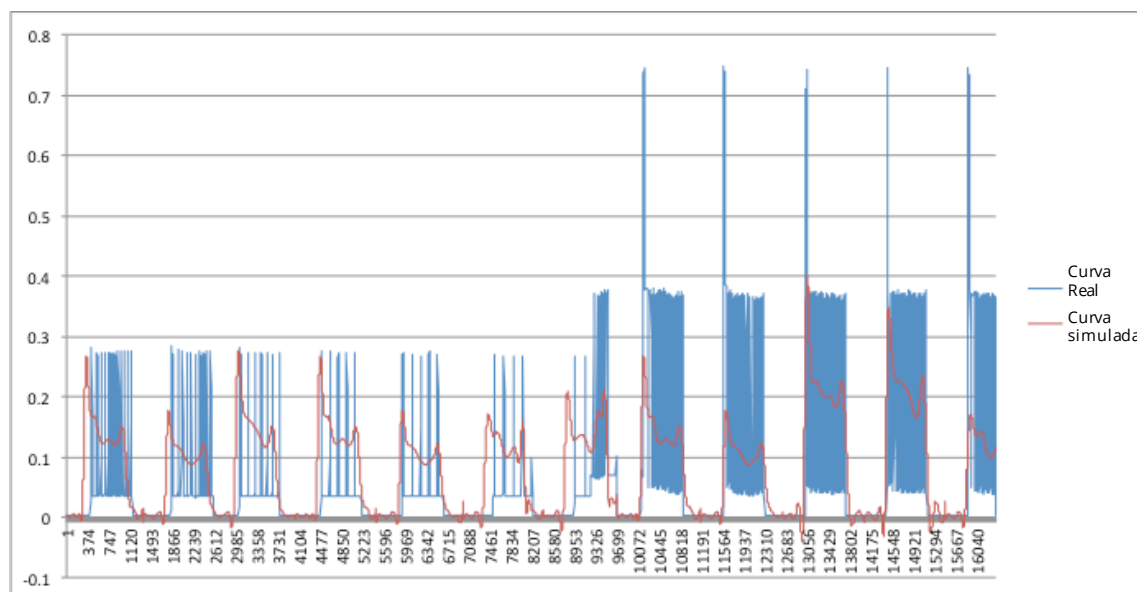
#### 4.3.6. Modelos de simulação quantitativos

Realizaram-se alguns estudos de modelização para simulação recorrendo a redes neurais artificiais de *Multilayer perceptron* com *hidden layer* de 30 neurónios. Foram ensaiados três conjuntos de parâmetros que se distinguem pela sua natureza: tempo, condições meteorológicas e condições geotérmicas. Os dados fornecidos foram estruturados e normalizados (normalização das entradas e saídas entre 0 e 1) para o efeito. O histórico de consumos foi separado em dois períodos distintos - aquecimento e arrefecimento - pelo que em cada estudo é analisada a precisão do modelo para ambos os períodos. A precisão do modelo é analisada com base no *Mean Square Error* (MSE) entre valores reais e valores obtidos por simulação, com base em amostras de teste não utilizadas para o treino do modelo.

Para a influência do contexto temporal no consumo de energia elétrica, a rede neuronal foi treinada com a hora do dia e o dia da semana como parâmetros de entrada. Nas Figura 61 e Figura 62 verifica-se que o modelo gera valores por simulação que apresentam alguma relação com os valores reais, tendo o contexto temporal como variável de entrada. Contudo, dada a discrepância significativa entre a curva real e a curva obtida, conclui-se que o contexto temporal não é, por si só, informação suficiente para modelizar, quantitativamente, o consumo elétrico da bomba de calor.



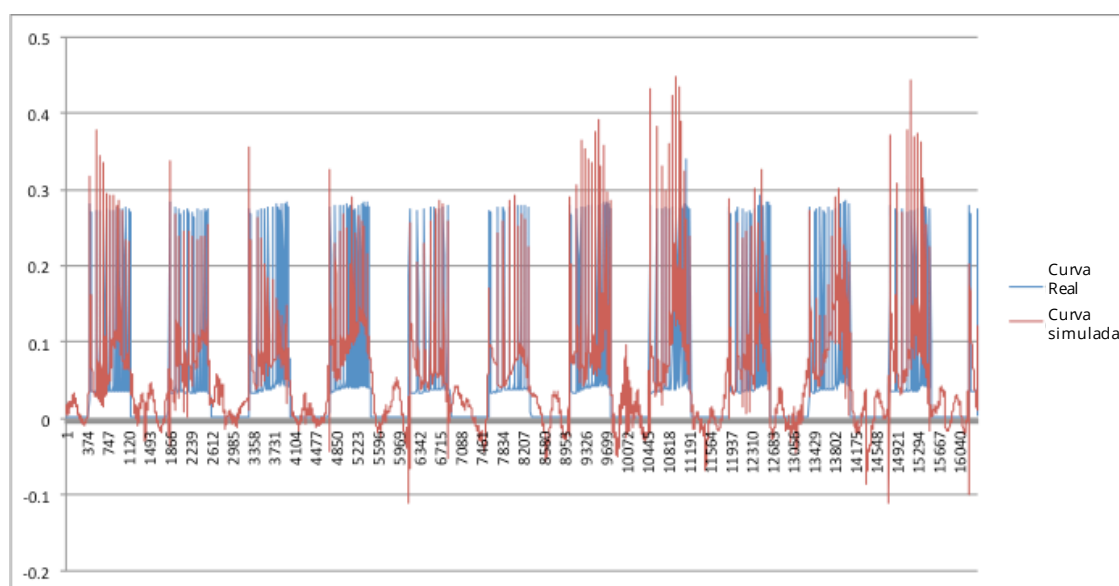
**Figura 61 – Resultados da modelização da influência do contexto temporal no consumo de energia elétrica no período de aquecimento.**



**Figura 62 – Resultados da modelização da influência do contexto temporal no consumo de energia elétrica no período de arrefecimento.**

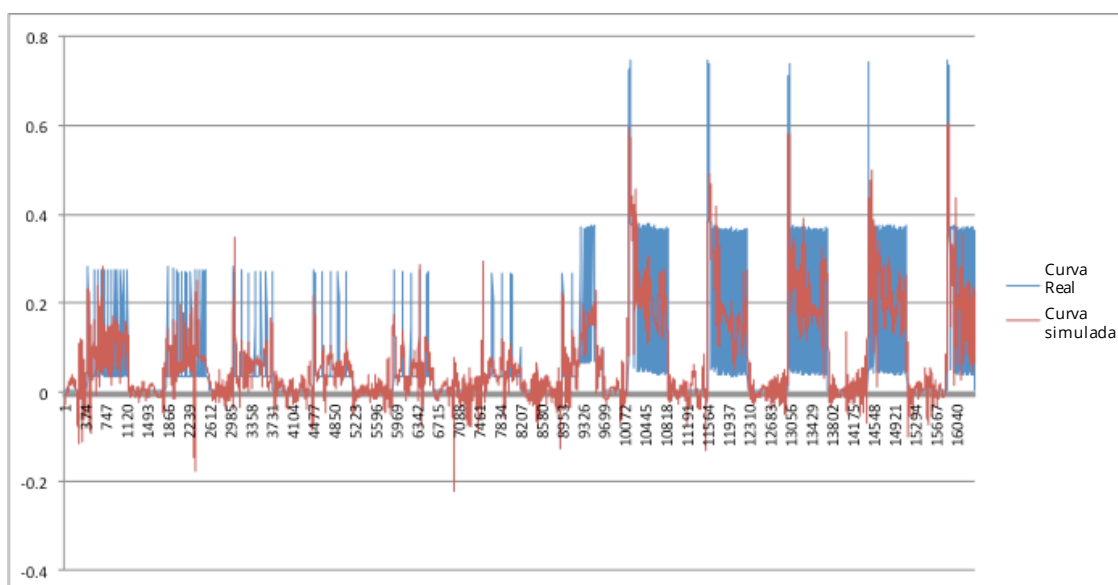
Foi realizado um estudo sobre a influência do conjunto do contexto temporal e contexto meteorológico no consumo de energia elétrica. Neste estudo a rede neuronal foi treinada com a hora do dia, o dia da semana, a humidade e a temperatura externa como parâmetros de entrada.

Finalmente, foi adicionada como entrada a temperatura do reservatório geotérmico para se estudar a influência do conjunto contexto temporal, meteorológico e geotérmico no consumo de energia elétrica. A rede neuronal foi treinada com a hora do dia, o dia da semana, a humidade, a temperatura externa e a temperatura do reservatório como parâmetros de entrada.



**Figura 63 – Resultados da modelização da influência do conjunto do contexto meteorológico, temporal e geotérmico no consumo de energia elétrica no período de aquecimento.**





**Figura 64 - Resultados da modelização da influência do conjunto do contexto meteorológico, temporal e geotérmico no consumo de energia elétrica no período de arrefecimento.**

Observando as Figura 63 e Figura 64 verifica-se que os resultados da simulação já apresentam um acompanhamento mais aproximado da curva real, inclusive dos picos de consumo da bomba de calor, tanto para o período de arrefecimento como para o período de aquecimento.

Os valores de MSE foram registados na Tabela 1.

**Tabela 1 – Resumo de resultados das várias instâncias quantitativas para o sistema de aproveitamento geotérmico para climatização.**

<i><b>Parâmetros de Entrada (ANN)</b></i>	<b>MSE</b>	
	<i><b>Aquecimento</b></i>	<i><b>Arrefecimento</b></i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hora do dia</li> <li>• Dia da semana</li> </ul>	1.646E-2	1.380E-2
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura</li> <li>• Humidade</li> </ul>	1.689E-2	1.380E-2
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hora do dia</li> <li>• Dia da semana</li> <li>• Temperatura</li> <li>• Humidade</li> </ul>	9.146E-3	7.988E-3
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hora do dia</li> <li>• Dia da semana</li> <li>• Temperatura</li> <li>• Humidade</li> <li>• Temperatura do reservatório</li> </ul>	9.071E-3	8.644E-3

Verifica-se que, quando o modelo é treinado apenas com informação sobre o contexto temporal ou sobre o contexto meteorológico, o modelo apresenta valores de MSE mais elevados.

Estes resultados melhoram substancialmente, através da conjugação do contexto temporal com o contexto meteorológico. A integração de informação sobre o contexto geotérmico contribui para melhorar, residualmente, o valor de MSE para o período de aquecimento. Contudo, para o período de arrefecimento os resultados pioram ligeiramente.

## 4.4. Sistema de aproveitamento solar fotovoltaico

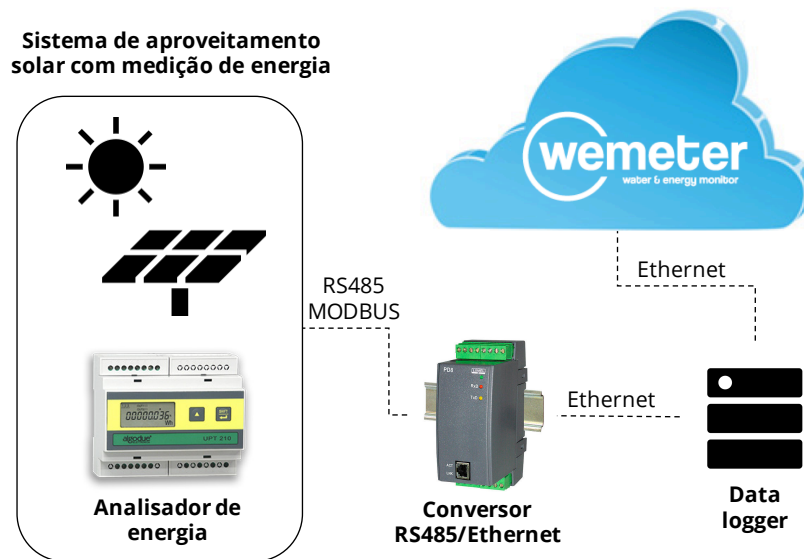
### 4.4.1. Caracterização do sistema

Pretende-se validar o modelo conceptual, num sistema de aproveitamento solar fotovoltaico real e respetiva análise da relação da sua produção de energia elétrica, com diferentes fatores que poderão influenciar o seu funcionamento. Para tal foi considerado um sistema de aproveitamento solar instalado no edifício do DEE. Este sistema consiste num conjunto de painéis fotovoltaicos com uma capacidade total instalada de 0.75kW, apresentado na Figura 65.



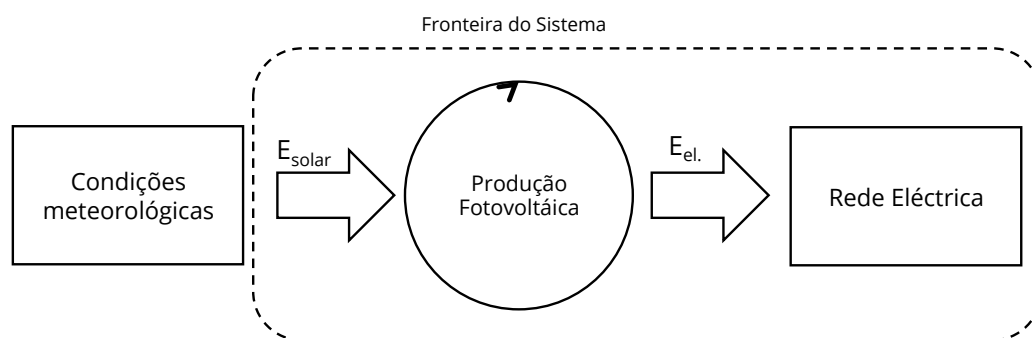
**Figura 65 - Sistema de aproveitamento solar fotovoltaico.**

Com a finalidade de determinar a produção de energia elétrica do sistema, foi instalado um analisador de energia no inversor de potência dos painéis. Como inicialmente descrito na Secção 4.2, este analisador de energia utiliza um protocolo de comunicação série *Modbus* por *RS-485* para transmitir os dados. Estes dados são recolhidos num servidor na cave do edifício (*Data Logger*) através de um módulo *Gateway Ethernet/RS-485* que converte o protocolo *RS-485* em *Ethernet*, para comunicação com o servidor. Por sua vez estes dados são enviados para os servidores do *Wemeter*. Este sistema de monitorização descrito encontra-se representado com mais pormenor na Figura 66.



**Figura 66 – Sistema de monitorização da produção de energia para o sistema de aproveitamento solar fotovoltaico.**

O aproveitamento de energia solar e a subsequente produção de energia elétrica depende da quantidade de radiação solar disponível captada pelo conjunto de painéis. Este processo encontra-se representado no diagrama da Figura 67. A temperatura tem aqui um papel importante por influenciar o rendimento dos painéis fotovoltaicos. Por questões de simplicidade do sistema assumiu-se que se trata de um sistema de micro-geração em que toda a energia elétrica produzida é enviada para a rede elétrica.



**Figura 67 - Balanço energético do sistema de aproveitamento solar fotovoltaico.**

#### 4.4.2. Descrição do submodelo

O sistema descrito é modelizável através de um submodelo que relacione a produção de energia elétrica em função do contexto temporal e meteorológico, como representado na Figura 68.



**Figura 68 - Submodelo do sistema de aproveitamento solar fotovoltaico.**

Como descrito no Capítulo 3.4.3, o submodelo pode ser especificado segundo um conjunto de *entradas* ( $e_i$ ), *saídas* ( $s_i$ ), *suposições* ( $su_i$ ), *elementos*  $el_i$  e *relações* entre *entradas* e *saídas* ( $\{r_i\} = \{e_i \rightarrow s_j\}$ ):

$$\left\{ \begin{array}{l} \{e_1\} = \{\text{condições climáticas (Contexto Meteorológico), hora e mês (Contexto Temporal)}\} \\ \{s_1\} = \{\text{produção elétrica (Dispositivo)}\} \\ \{el_1\} = \{\text{sistema fotovoltaico (Dispositivo)}\} \\ \{r_1, r_2\} = \{\text{condições climáticas (Contexto Meteorológico)} \rightarrow \text{produção elétrica (Dispositivo)}, \\ \text{hora e mês (Contexto Temporal)} \rightarrow \text{produção elétrica (Dispositivo)}\} \end{array} \right.$$

Para este submodelo foram consideradas como entradas as condições climáticas, a hora e o mês. Como saídas considerou-se a produção elétrica. Identificam-se relações, ainda, entre a produção elétrica e as condições meteorológicas, a hora e o mês.

#### 4.4.3. Instâncias qualitativas do modelo conceptual

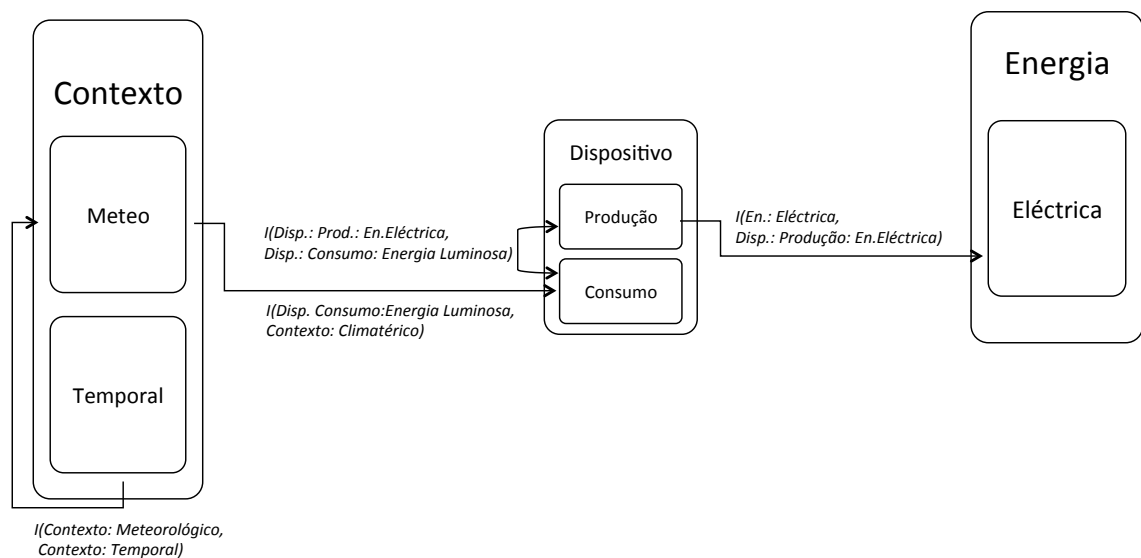
Para a modelização qualitativa do presente sistema surge a *query* seguinte:

*“Qual o efeito das condições climáticas e do contexto temporal na produção de energia elétrica do sistema de aproveitamento solar fotovoltaico do edifício?”*

O cenário considerado consiste num sistema de aproveitamento solar fotovoltaico, com operação e consequente produção elétrica condicionadas por:

- Condições climáticas envolventes;
- contexto temporal.

Para este cenário e subsequente *query* define-se a teoria de domínio representada no diagrama da Figura 69, onde estão representadas, também, as relações definidas no modelo conceptual para os conceitos considerados relevantes para o sistema em questão.



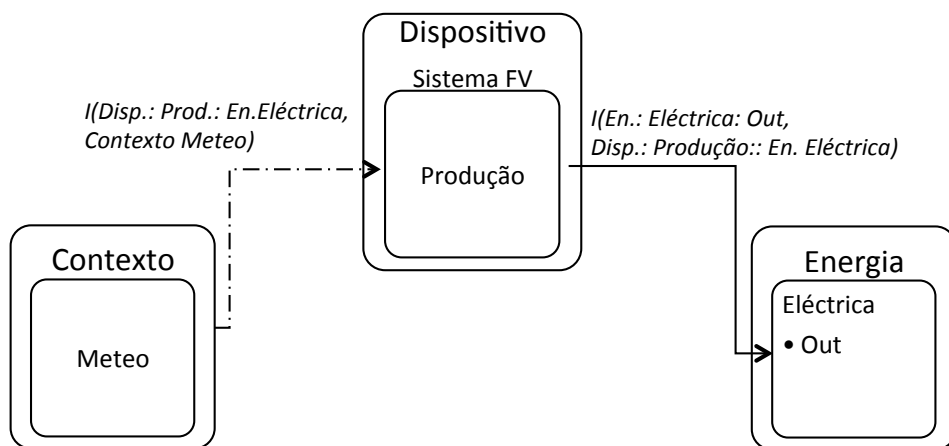
**Figura 69 - Teoria de domínio da instância qualitativa do sistema de aproveitamento solar fotovoltaico.**

Identifica-se a relação direta entre o contexto temporal e o meteorológico. A hora do dia e a própria estação do ano influenciam, diretamente, as condições meteorológicas envolvidas do sistema. Por sua vez o contexto meteorológico influencia o consumo de energia luminosa solar para produção de energia elétrica. Esta, por último, está diretamente relacionada com o balanço de energia elétrica do sistema.

O sistema a modelizar pode ser dividido em dois submodelos complementares, analisados separadamente. Estas relações são analisadas e pormenorizadas nas respetivas instâncias qualitativas do submodelo.

#### 4.4.3.1. Influência do contexto meteorológico na produção de energia elétrica

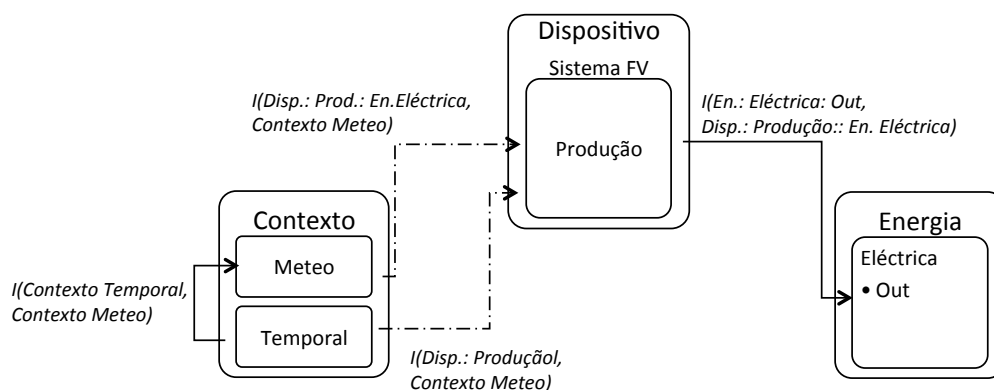
Dada a dependência entre a energia solar disponível para aproveitamento fotovoltaico e a temperatura e radiação solar, considera-se existir uma relação direta entre o consumo de energia solar e as condições climáticas, em particular a radiação solar e a temperatura exterior. Por sua vez, a produção de energia elétrica está relacionada, diretamente, com o consumo de energia solar. Desta forma considera-se existir uma relação indireta entre as condições climáticas e a energia elétrica produzida pelo dispositivo. Estas relações estão representadas na Figura 70.



**Figura 70 - Influência do contexto meteorológico na produção de energia elétrica para a instância qualitativa do sistema de aproveitamento solar fotovoltaico.**

#### 4.4.3.2. Influência do contexto temporal na produção de energia elétrica

Fatores temporais, como a hora do dia ou a estação do ano, influenciam a radiação solar disponível e a temperatura exterior. Constata-se que existe uma relação direta entre o contexto temporal e as condições climáticas. Desta forma considera-se existir uma relação indireta entre o contexto temporal e a energia elétrica produzida pelo dispositivo. Esta última influencia, diretamente, o balanço da energia elétrica que sai do sistema de produção fotovoltaica. Estas relações estão representadas na Figura 71.



**Figura 71 - Influência do contexto temporal na produção de energia elétrica para a instância qualitativa do sistema de aproveitamento solar fotovoltaico.**

#### 4.4.4. Modelos de simulação qualitativos

Para o modelo de simulação qualitativo foram adicionadas como entidades os conceitos de dispositivo de produção, como o apresentado na Figura 72.

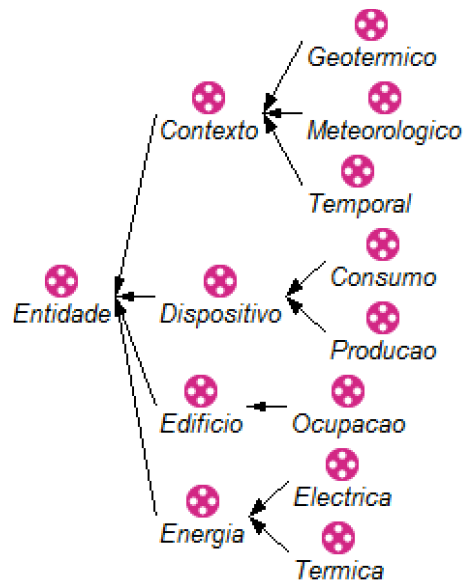


Figura 72 – Entidades da instância qualitativa do sistema de aproveitamento solar fotovoltaico.

O cenário do modelo, representado na Figura 73, acrescenta as relações entre o contexto temporal, meteorológica, a produção de energia do dispositivo (sistema de aproveitamento solar fotovoltaico), e o balanço de energia elétrica do sistema.

Como intervalos qualitativos consideraram-se os períodos (diurno e noturno) e a estação do ano (contexto Temporal), a temperatura exterior e a radiação solar (contexto Meteorológico), a quantidade de energia (Produção do dispositivo) e o balanço de saída de energia Eléctrica.

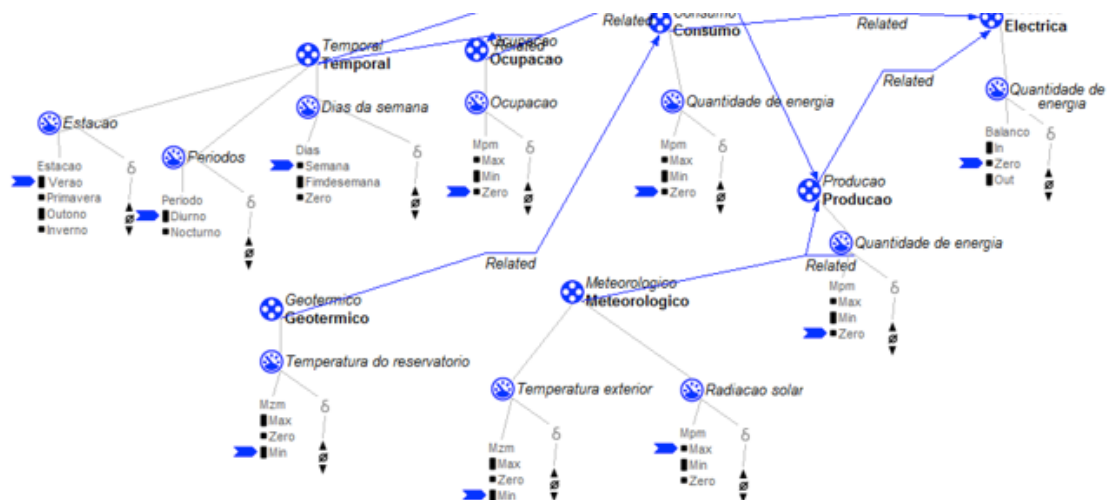


Figura 73 - Cenário da instância qualitativa do sistema de aproveitamento solar fotovoltaico.

Como condições iniciais do cenário especificou-se que o sistema se encontra a operar durante o Verão, no período diurno, com a temperatura exterior mínima e radiação solar máxima.

De acordo com as instâncias do modelo conceptual definidas, anteriormente, estabeleceram-se as relações entre entidades do cenário da Figura 73 e foram construídos os fragmentos do modelo de simulação qualitativo seguintes:

- Influência do contexto meteorológico na produção de energia elétrica;
- Influência do contexto temporal na produção de energia elétrica.

Para modelizar, qualitativamente, a influência do contexto meteorológico na produção de energia elétrica, à semelhança do submodelo anterior e da sua instanciação qualitativa definida na Secção 4.3.4, definiram-se fragmentos de modelo de simulação para modelizar, qualitativamente, o comportamento do balanço de energia elétrica do sistema, em função da produção elétrica do dispositivo de aproveitamento fotovoltaico e do contexto meteorológico (radiação solar e temperatura). Assumiu-se que a quantidade de energia produzida é influenciada, positivamente, pela radiação solar e, negativamente, pela temperatura exterior, assim como a energia elétrica que sai do sistema.

Como esperado, verifica-se um incremento do balanço de energia elétrica de saída, em ambas as situações, decorrentes das condições iniciais do cenário (radiação solar máxima e temperatura exterior mínima).

Para modelizar, qualitativamente, a Influência do contexto temporal na produção de energia elétrica definiu-se um fragmento de modelo que pretende modelizar, qualitativamente, o comportamento do balanço de energia elétrica do sistema, em função da produção elétrica do dispositivo de aproveitamento fotovoltaico e do contexto temporal. Assumiu-se que a quantidade de energia produzida é influenciada, positivamente, por períodos de horários diurnos e por estações com maior exposição solar, assim como a energia elétrica que sai do sistema.

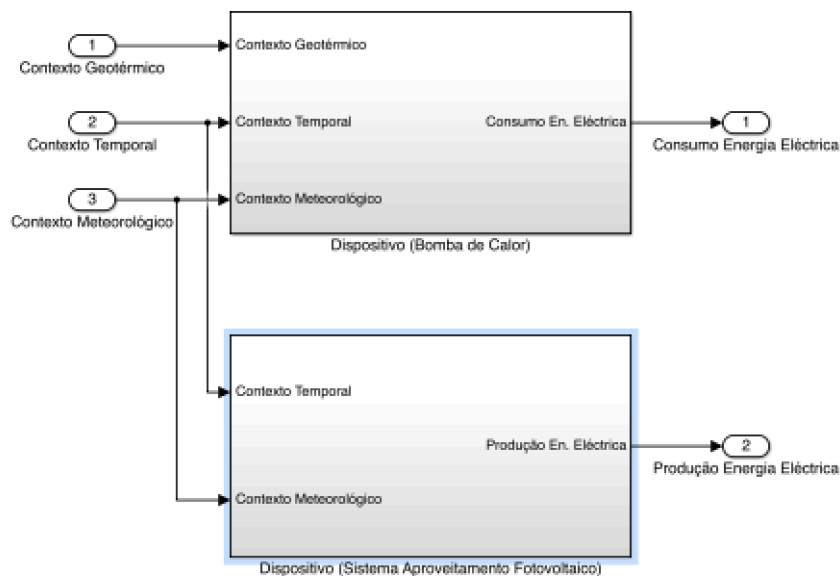
Também como esperado, verifica-se um incremento do balanço de energia elétrica de saída, decorrente das condições iniciais do cenário (período diurno durante o Verão).

De acordo com as instâncias qualitativas especificadas na Secção 4.4.3, em conjunto com os estudos realizado com os fragmentos de modelo qualitativos, especificou-se o contexto meteorológico e temporal como entradas relevantes e com relações de influência sobre a produção de energia do sistema. Estas considerações foram tidas em conta para se conceber o modelo quantitativo do sistema, descrito na próxima secção.

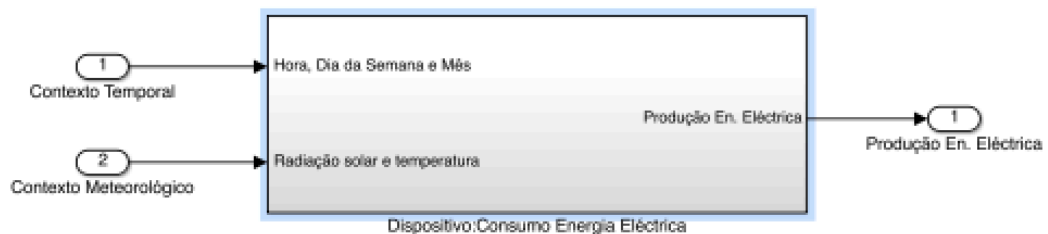
#### 4.4.5. Instâncias quantitativas do modelo conceptual

Para o sistema de aproveitamento solar fotovoltaico considerou-se que parte do modelo global do edifício é constituído pelo submodelo quantitativo do sistema anterior da Figura 60 e pelo submodelo do subsistema representado na Figura 75. Neste caso foram adicionadas às saídas do modelo do sistema a Produção de energia Elétrica do edifício (Figura 74).





**Figura 74 - Bloco do submodelo quantitativo formado pelo conjunto do consumo de energia eléctrica da bomba de calor e pela produção do sistema de aproveitamento solar fotovoltaico.**

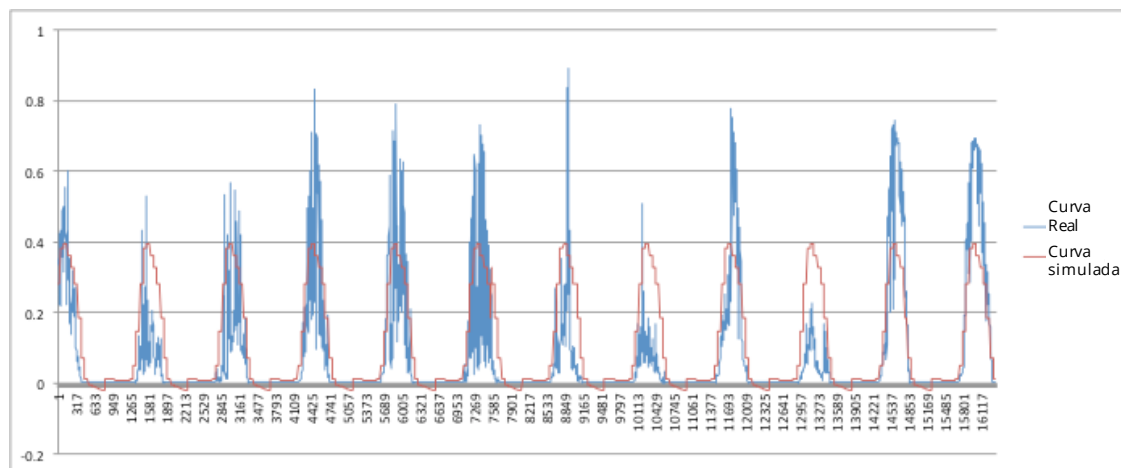


**Figura 75 - Bloco do submodelo quantitativo para a produção eléctrica do sistema de aproveitamento solar fotovoltaico.**

#### 4.4.5.1. Modelos de simulação quantitativos

Realizaram-se alguns estudos de modelização para simulação recorrendo a redes neurais artificiais com a mesma configuração dos estudos realizados na Secção 4.3.6, ensaiando dois conjuntos de parâmetros que se distinguem pela sua natureza: tempo e condições atmosféricas. Também neste estudo os dados fornecidos foram estruturados e normalizados e a precisão do modelo é analisada com base no indicador de erro *MSE*.

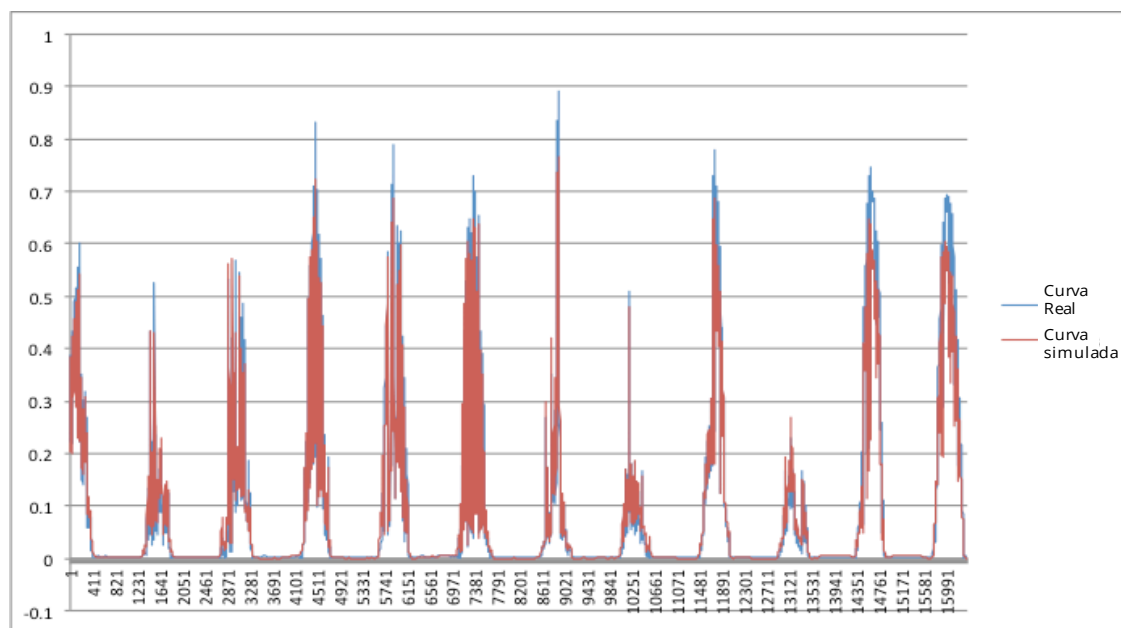
A rede neuronal foi treinada com a hora do dia, o dia da semana e o mês do ano como parâmetros de entrada.



**Figura 76 - Resultado da simulação em *Matlab* com ANN do perfil de produção de energia elétrica em função do contexto temporal.**

Verifica-se que a curva da produção de energia obtida por simulação acompanha a curva real, usando o contexto temporal como variável de entrada. No entanto, dada a incapacidade do modelo de acompanhar os picos de produção (Figura 76), não se pode afirmar que o contexto temporal seja, por si só, uma fonte de informação suficiente para a modelização quantitativa da produção elétrica fotovoltaica.

Finalmente, de forma a avaliar a influência do conjunto contexto meteorológico e temporal na produção de energia elétrica, a rede neuronal foi treinada com a hora do dia, o dia da semana, o mês do ano, a radiação solar e a temperatura exterior como parâmetros de entrada, utilizando a estrutura representada na Figura 77.



**Figura 77 - Resultado da simulação em *Matlab* com ANN do perfil de produção de energia elétrica.**

A Tabela 2 sintetiza os resultados dos vários modelos quantitativos, em termos de MSE. Verifica-se que o modelo apresenta os melhores resultados, comparativamente, às instâncias quantitativas anteriores, através da conjugação do contexto temporal e do contexto meteorológico. Observa-se que o fator essencial é o contexto meteorológico, existindo pouca melhoria na utilização conjunta com o contexto temporal. Da análise das curvas de produção elétrica fotovoltaica real e prevista ao longo do tempo verifica-se que o gráfico obtido da simulação com todas as entradas demonstra um acompanhamento dos picos de produção real.

**Tabela 2 – Resumo de resultados das várias instâncias quantitativas para o sistema de aproveitamento solar fotovoltaico.**

<b><i>Parâmetros de Entrada (ANN)</i></b>	<b><i>MSE</i></b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Hora do dia</i></li> <li>• <i>Dia da semana</i></li> <li>• <i>Mês do ano</i></li> </ul>	1.414E-2
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Temperatura exterior</i></li> <li>• <i>Radiação solar</i></li> </ul>	3.708E-3
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Hora do dia</i></li> <li>• <i>Dia da semana</i></li> <li>• <i>Mês do ano</i></li> <li>• <i>Temperatura exterior</i></li> <li>• <i>Radiação solar</i></li> </ul>	0.263E-3

## 4.5. Consumo elétrico de um edifício

### 4.5.1. Caracterização do sistema

De forma a demonstrar a abrangência da metodologia de modelização desenvolvida, é feito o estudo da influência da lotação de um parque de estacionamento associado a um edifício no consumo elétrico do mesmo. Para o presente estudo foi considerado o edifício do DEE.

O parque de estacionamento do *campus* referido inclui os parques interiores e os periféricos, apresentados na Figura 78. Este cenário inclui desafios adicionais, como por exemplo a capacidade total do parque de estacionamento. Esta é desconhecida, pois não existe limite de admissões e verifica-se, muitas vezes, o estacionamento em locais não delimitados, podendo assim exceder, facilmente, a capacidade projetada. Para avaliar a influência da lotação do parque de estacionamento, associado ao edifício, no seu consumo elétrico foram utilizados diversos sistemas de aquisição de dados, nomeadamente:

- Aquisição de dados relativos à ocupação do edifício em questão;
- Aquisição de dados relativos à lotação do parque de estacionamento do recinto;
- Aquisição de dados relativos ao consumo elétrico real do edifício em questão.



**Figura 78 - Mapa do *campus* da Faculdade de Ciências e Tecnologia.**

Adquiriram-se dados relativos à lotação do parque de estacionamento do recinto, a partir dos registos de controlo do sistema de acesso ao parque, constituído por uma cancela e um detetor de *Radio-Frequency Identification* (RFID). Foram apenas considerados os dados relativos aos alunos, docentes e funcionários do DEE, por esses constituírem o grosso do número de utilizadores do edifício.

Para a aquisição dos dados relativos à ocupação do edifício, foi desenvolvido um módulo que permite receber e processar dados de sensores de infravermelhos, guardando-os posteriormente, numa base de dados com o registo das presenças ao longo do tempo. O módulo, que se encontra representado na

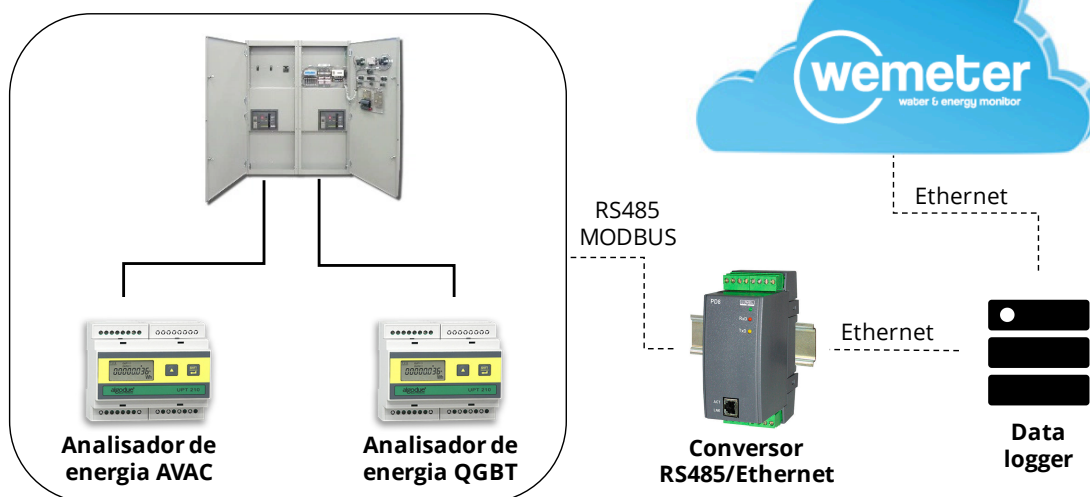
Figura 79, funciona de acordo com o conceito de tripwire, em que a deteção das passagens faz-se aquando da alternância entre a existência ou não de obstáculos no caminho dos sensores.



**Figura 79 – Sistema de monitorização da ocupação do edifício do DEE.**

Para se determinar o consumo elétrico do edifício, instalaram-se dois analisadores de energia no Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT) do edifício. O primeiro a seguir ao disjuntor geral e o segundo a seguir ao disjuntor de alimentação do sistema AVAC, de forma a obter-se a potência ativa instantânea de todo o edifício e do sistema AVAC, em separado. Utilizou-se o mesmo sistema de monitorização descrito anteriormente na Secção 4.2, semelhante ao setup experimental apresentado na Secção 4.4.1 e representado na Figura 80 e na Figura 81.

#### Sistema de aproveitamento solar com medição de energia



**Figura 80 – Sistema de monitorização do consumo de energia do edifício do DEE.**

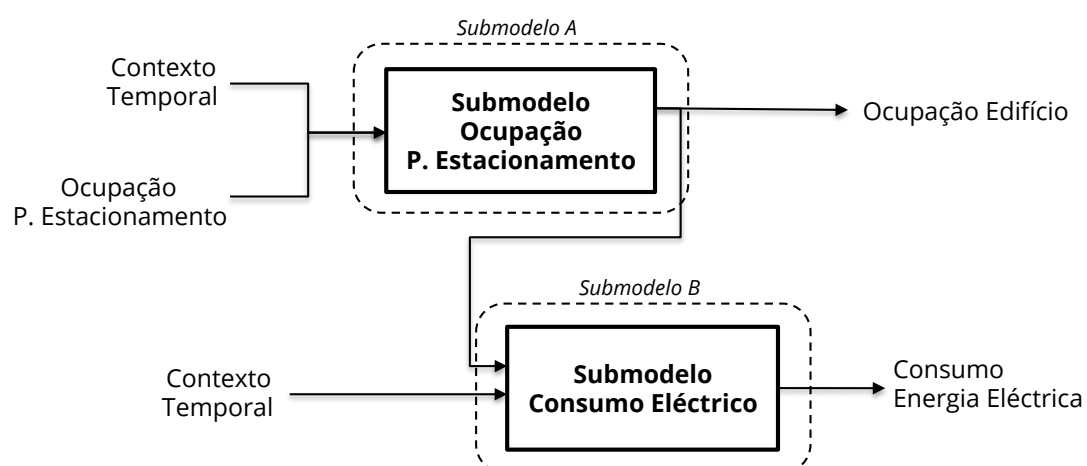


**Figura 81 – Analisadores de energia instalados no QGBT do edifício do DEE.**

#### 4.5.2. Descrição do submodelo

O sistema descrito pode ser representado pelos dois submodelos representados na Figura 82.

. No Submodelo A considera-se que existem relações entre o contexto temporal, a ocupação do parque de estacionamento e a ocupação do próprio edifício, sendo esta última o resultado obtido do submodelo A. Por sua vez, no Submodelo B esta ocupação, em conjunto com o contexto temporal, relaciona-se com o consumo de energia elétrica global do edifício.



**Figura 82 - Submodelos do sistema de consumo de energia elétrica do edifício do DEE.**



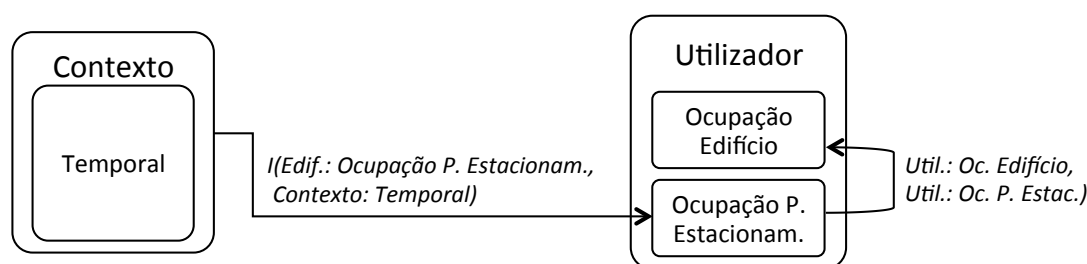
O cenário considerado consiste num edifício cujo consumo global é condicionado pela ocupação do mesmo e onde, por sua vez, a ocupação deste é condicionada pelo contexto temporal. Para este cenário e subsequentes queries define-se a teoria de domínio representada no diagrama da Figura 83 onde estão representadas, também, as relações definidas no modelo conceptual dos conceitos considerados relevantes para o sistema em questão.

Os horários das aulas dependem da hora do dia, do dia da semana e do mês, o que influencia a afluência de veículos de estudantes ao parque de estacionamento. O número de veículos de estudantes no parque de estacionamento é um indicador importante sobre a ocupação do próprio edifício. O contexto temporal e a quantidade de visitantes do edifício influenciam o consumo global do mesmo, que por sua vez tem um efeito direto no balanço de energia elétrica do sistema.

O sistema a modelizar pode ser dividido em dois submodelos distintos, mas complementares, descritos nas secções seguintes.

#### 4.5.3.1. Influência do conjunto contexto temporal e ocupação do parque de estacionamento na ocupação do edifício

Dadas as considerações anteriores, existe a relação direta entre a ocupação do parque de estacionamento do edifício e o contexto temporal, particularmente a hora do dia, o dia da semana e o mês do ano. Por sua vez a ocupação do edifício está relacionada com o número de viaturas no parque de estacionamento. Estas relações estão representadas na Figura 84.

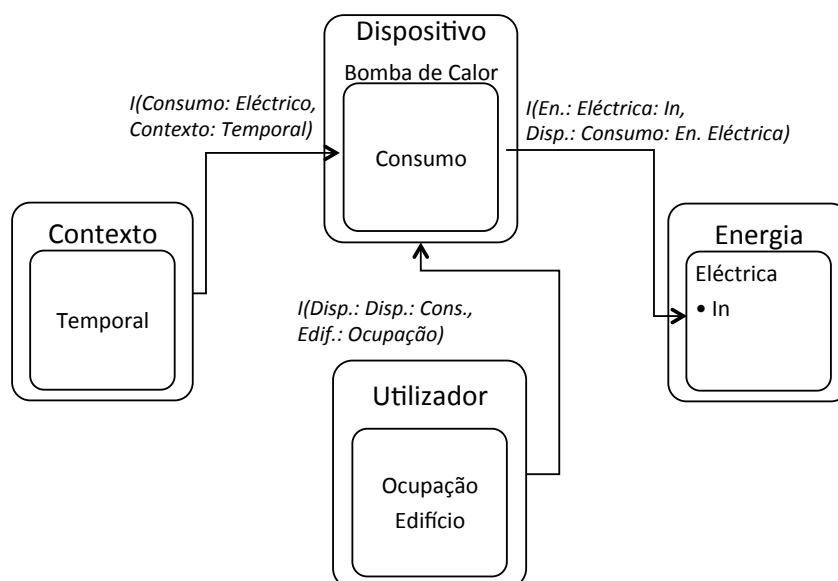


**Figura 84 - Influência do contexto temporal e ocupação do parque de estacionamento na ocupação do edifício para a instância qualitativa de consumo elétrico do edifício do DEE.**

#### 4.5.3.2. Influência do conjunto contexto temporal e ocupação do edifício no balanço elétrico do edifício

De igual forma, pelo apresentado na Secção 4.5.3, existe uma relação direta entre o consumo dos sistemas do edifício, o contexto temporal e a ocupação do próprio edifício. Por sua vez, o balanço de energia elétrica do edifício está relacionado com os seus sistemas de consumo elétrico. Estas relações estão representadas na Figura 85.

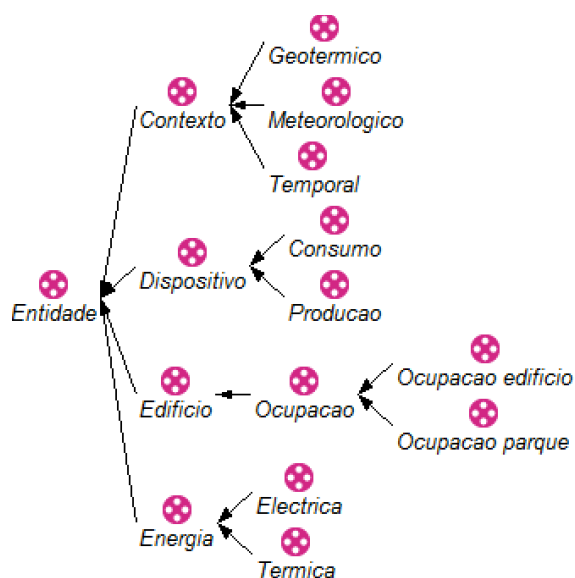




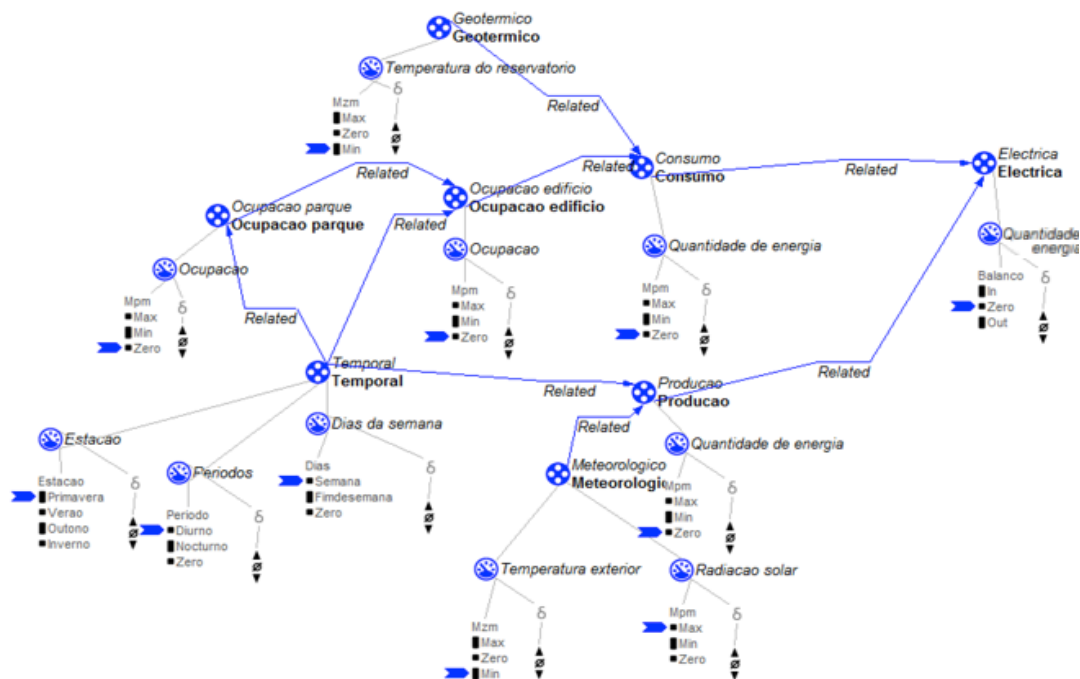
**Figura 85 - Influência do contexto temporal e da ocupação do edifício no consumo dos sistemas do edifício e no balanço elétrico do próprio edifício, para a instância qualitativa de consumo elétrico do edifício do DEE.**

#### 4.5.4. Modelos de simulação qualitativos

Para o modelo de simulação qualitativo adicionaram-se os conceitos de ocupação do edifício e da ocupação do parque de estacionamento como entidades, representados na Figura 86.



**Figura 86 – Entidades da instância qualitativa dos sistemas de consumo elétrico do edifício.**



**Figura 87 - Cenário da instância qualitativa do consumo elétrico do edifício.**

O cenário do presente modelo qualitativo, representado na Figura 87, tem como base os dois cenários apresentados nos casos de aplicação anteriores. Acrescentaram-se as relações entre o contexto temporal, a ocupação do parque e do próprio edifício e, ainda, o consumo de energia do dispositivo (neste caso o conjunto dos sistemas de consumo do edifício).

Para as novas entidades adicionadas, foram considerados os respectivos intervalos qualitativos, nomeadamente: os períodos (diurno e noturno), a estação do ano, e o dia da semana (contexto Temporal); e a quantidade de visitantes (Ocupação do edifício e Ocupação do P. Estacionamento).

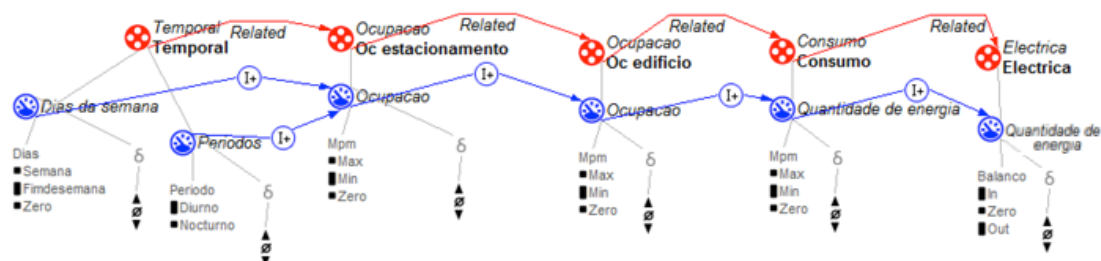
Neste caso de aplicação especificou-se no respetivo cenário que o sistema se encontra a operar durante o Verão, no período diurno, durante a semana e sem ocupantes no edifício e no parque de estacionamento.

Estabeleceram-se as relações entre entidades do cenário da

Figura 88 e foi construído um fragmento de modelo qualitativo que engloba as relações seguintes:

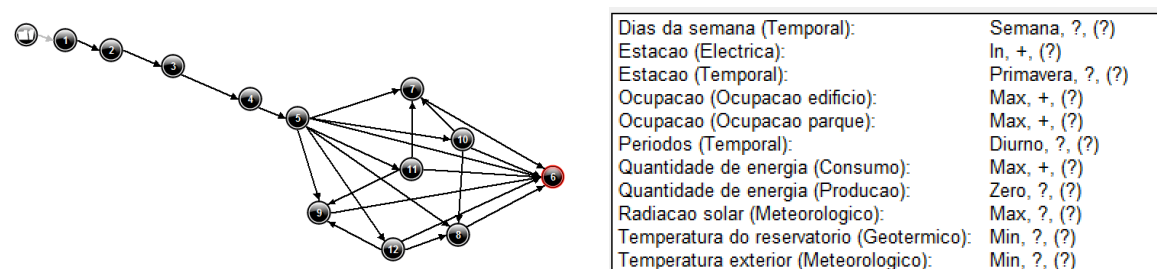
- Influência do conjunto contexto temporal e ocupação do parque de estacionamento na ocupação do edifício;
- Influência do conjunto contexto temporal e ocupação do edifício no balanço elétrico do edifício.

Assumiu-se que a ocupação do parque de estacionamento é influenciada, positivamente, em dias da semana e em períodos diurnos, e que a ocupação do próprio edifício é influenciada, também, positivamente, por esta ocupação do parque de estacionamento. Por sua vez, a ocupação do edifício influencia, positivamente, a quantidade de energia que é consumida e o balanço elétrico do edifício.



**Figura 88 - Fragmento de modelo para simulação do consumo elétrico do edifício.**

Na Figura 89 está representado um dos últimos estados possíveis dos modelos de simulação onde são atingidos todos os máximos dos intervalos qualitativos para cada entidade, decorrente das influências positivas definidas no modelo.

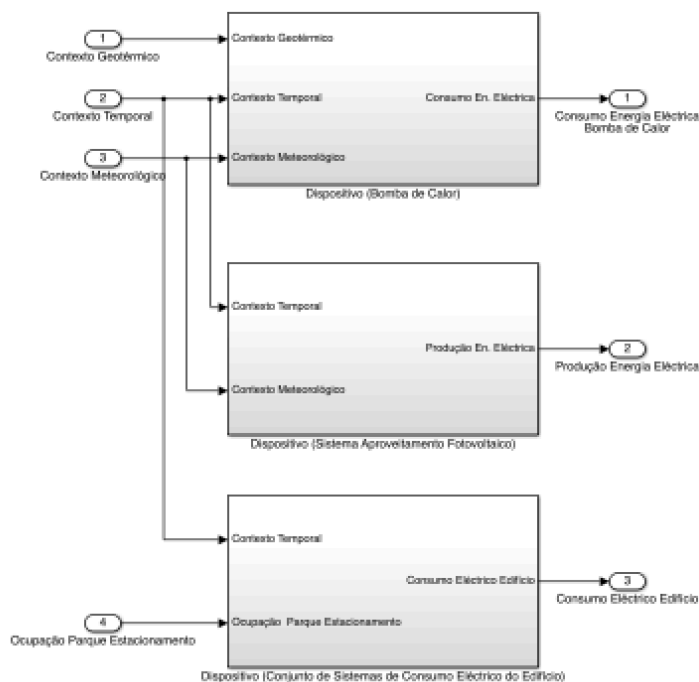


**Figura 89 – Estados do fragmento de modelo para simulação do consumo elétrico do edifício.**

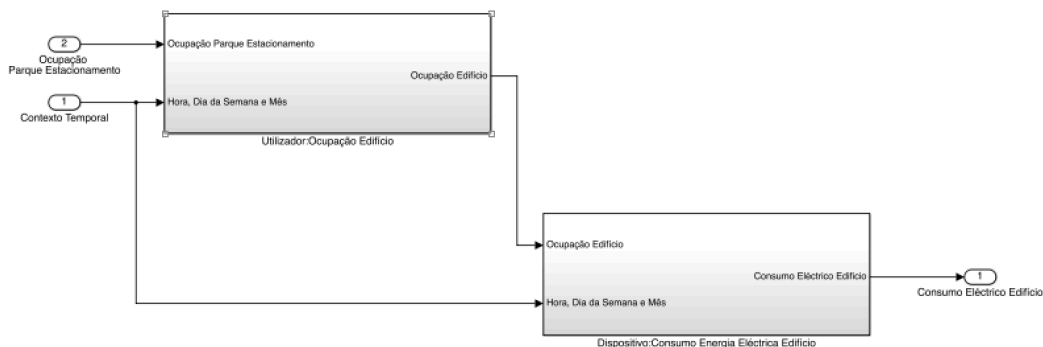
Com as instâncias qualitativas especificadas na Secção 4.5.4, juntamente com os estudos realizado com os fragmentos de modelo qualitativos, especificou-se o contexto meteorológico e temporal e a ocupação do edifício como entradas relevantes e com relações de influência sobre o consumo de energia do edifício. Estas considerações foram tidas em conta para se conceber o modelo quantitativo do sistema, descrito na próxima secção.

#### 4.5.5. Instâncias quantitativas do modelo conceptual

Para o conjunto de sistemas de consumo considerou-se que parte do modelo global do edifício é constituído pelos submodelos quantitativos dos subsistemas anteriores (Figura 74) e pelo submodelo do subsistema representado na Figura 91. Neste caso foram adicionadas às saídas do modelo do sistema o consumo elétrico do edifício (Figura 90).



**Figura 90 - Bloco do submodelo quantitativo para o consumo elétrico do edifício.**



**Figura 91 - Blocos do submodelo quantitativo da bomba de calor dividido em submodelos de ocupação do edifício e consumo de energia elétrica.**

Realizaram-se estudos de modelização para simulação recorrendo a redes neuronais artificiais (ANN), ensaiando dois conjuntos de parâmetros que se distinguem pela sua natureza: a) ocupação do parque de estacionamento e tempo; e b) ocupação do edifício e tempo. Para tal, os dados fornecidos foram estruturados e normalizados (entradas e saídas normalizadas entre 0 e 1 para o efeito). Foi analisada a correlação e erro dos seguintes submodelos: a) ocupação do edifício; e b) consumo elétrico do edifício.

#### 4.5.6. Modelos de simulação quantitativos

##### 4.5.6.1. Influência do conjunto contexto temporal e lotação do parque de estacionamento na ocupação do edifício

Para se avaliar a influência do conjunto contexto temporal e lotação do parque de estacionamento na ocupação do edifício foram dados os seguintes passos:

###### 1. Aquisição de dados relativos à ocupação do edifício

Registou-se a ocupação do edifício durante um curto período de tempo (8 semanas). Os resultados obtidos são apresentados na Figura 92 e demonstram um perfil de ocupação semelhante ao esperado, com as quintas-feiras a serem os dias com registo de maior ocupação e os fins-de-semana a apresentarem o menor nível de ocupação (os “Q” a vermelho representam as quintas-feiras).

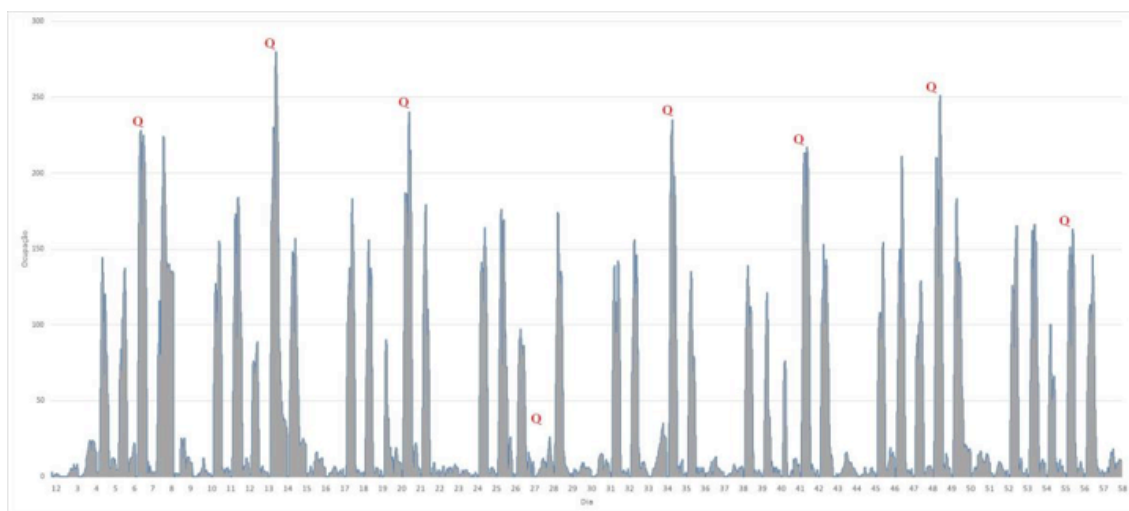
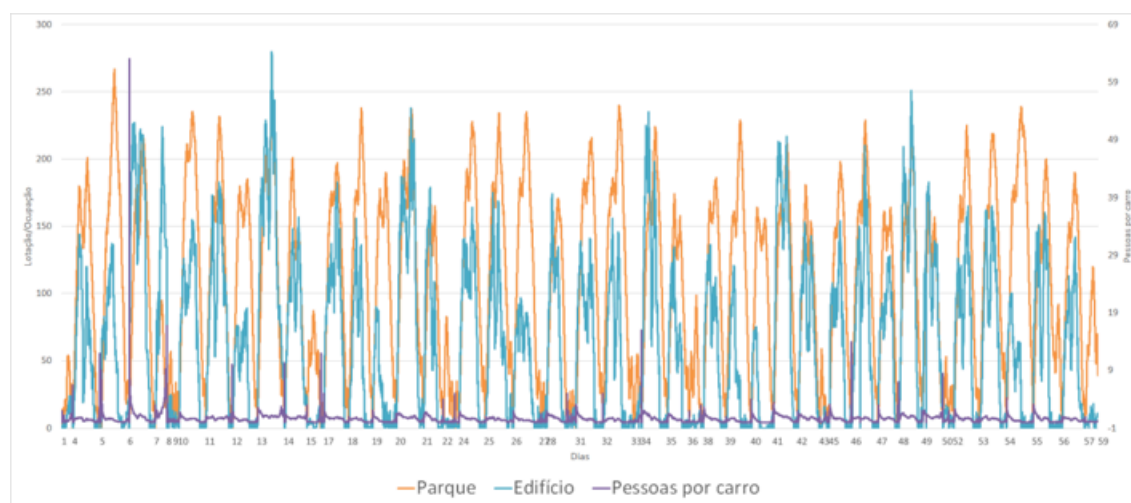


Figura 92 - Perfil de ocupação do edifício para 8 semanas.

Observa-se que a segunda-feira e terça-feira apresentam níveis de ocupação, tipicamente, semelhantes. Por norma, a quarta-feira é o dia útil com menor ocupação, o que reflete a realidade pelo facto de não haver aulas da parte da tarde, não só no edifício, mas em todo o *campus*. Observa-se ainda que a quinta-feira é o dia com maior ocupação, relativamente, aos restantes dias, devido aos horários das aulas. Pode ver-se na Figura 5.1 que uma das quintas-feiras (dia 27 da amostragem) apresenta um nível de ocupação máximo muito inferior ao que é típico, por coincidir com o feriado do dia 25 de Abril. Observou-se, também, que as sextas-feiras, tipicamente, apresentam uma ocupação semelhante à de segunda-feira e terça-feira. Nos fins-de-semana, a ocupação é muito inferior aos restantes dias por não existirem atividades no DEE ao sábado e ao domingo.

## 2. Aquisição de dados relativos à lotação do parque de estacionamento do recinto

Os dados referentes à lotação do parque de estacionamento estão representados na Figura 93 e foram, como referido, fornecidos pelo Gabinete de Segurança do *campus*. Estes dados contêm os eventos de entrada e saída em todos os parques do recinto, por parte dos alunos, docentes e funcionários do DEE. Os dados foram processados de forma a filtrar apenas a lotação correspondente aos docentes, alunos e funcionários do DEE. Os dados dizem respeito a 9 meses, sendo que na figura está apenas representada a ocupação do parque para as mesmas 8 semanas monitorizadas para a ocupação do edifício. A função de pessoas por carro foi obtida para cada amostra do número de pessoas e do número de carros através da divisão entre eles.



**Figura 93 - Lotação do parque, ocupação do edifício e pessoas por veículo ao longo de oito semanas.**

Na Figura 93 observa-se a variação, ao longo de oito semanas, da lotação do parque representada a laranja, da ocupação do edifício representada a azul, ambas com o eixo das ordenadas do lado esquerdo e do número de pessoas por carro a roxo, com o eixo das ordenadas do lado direito. Verifica-se que, apesar de não coincidirem em número, as curvas de ocupação e de lotação apresentam comportamentos semelhantes em termos de declives ao longo de cada dia. As curvas não são proporcionais visto que os ocupantes do parque de estacionamento estão dispersos por vários edifícios no *campus*, entre eles o DEE.

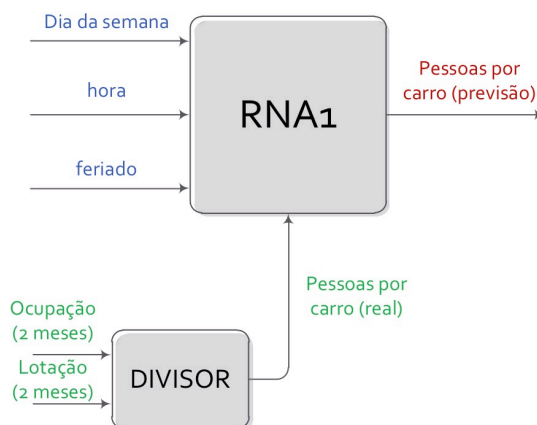
## 3. Extrapolação dos valores de ocupação para 9 meses

Uma vez obtidos, os dados da lotação do parque e da ocupação do edifício estes foram processados, de forma a obter-se a relação entre os dois. Essa relação corresponde ao número de pessoas por carro. Como os dados da ocupação só estão disponíveis para um curto período de tempo (oito semanas), para se estender uma previsão a nove meses é necessário extrapolar os valores para as restantes semanas. Com os dados de ocupação do edifício para oito semanas e os dados do parque truncados para o mesmo período, ambos referidos no ponto ante-

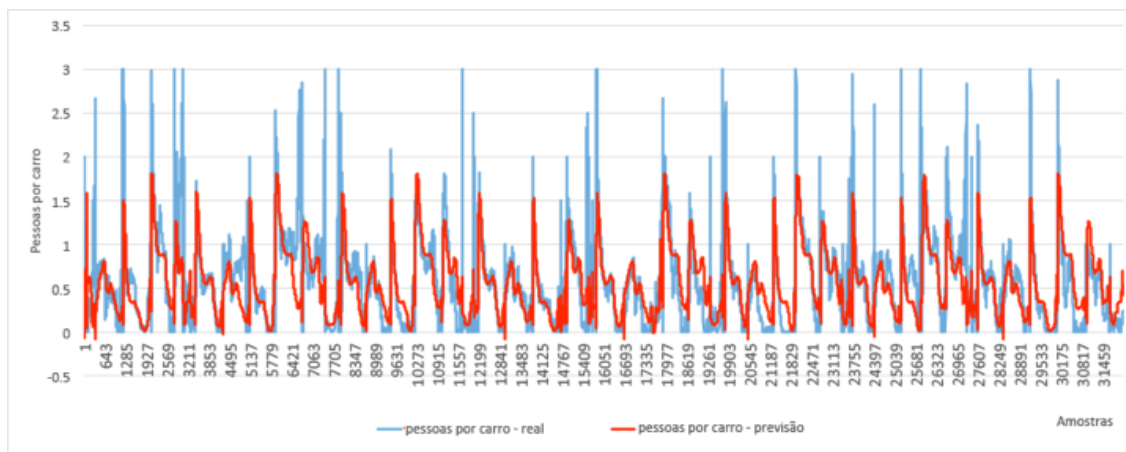
100

rior, desenvolveu-se um modelo baseado em redes neuronais com a finalidade de obter uma curva de previsão do número de pessoas por carro para o período considerado, para criar um perfil geral que possa ser aplicado na previsão do consumo elétrico para outros períodos.

O modelo foi desenvolvido com a configuração da Figura 94. Utilizaram-se como entradas a hora do dia, o dia da semana, se um dia é ou não feriado e, ainda, o número de pessoas por veículo real (obtido pela divisão entre a ocupação e a lotação).



**Figura 94 - Configuração da ANN utilizada para criar um perfil geral de pessoas por carro.**

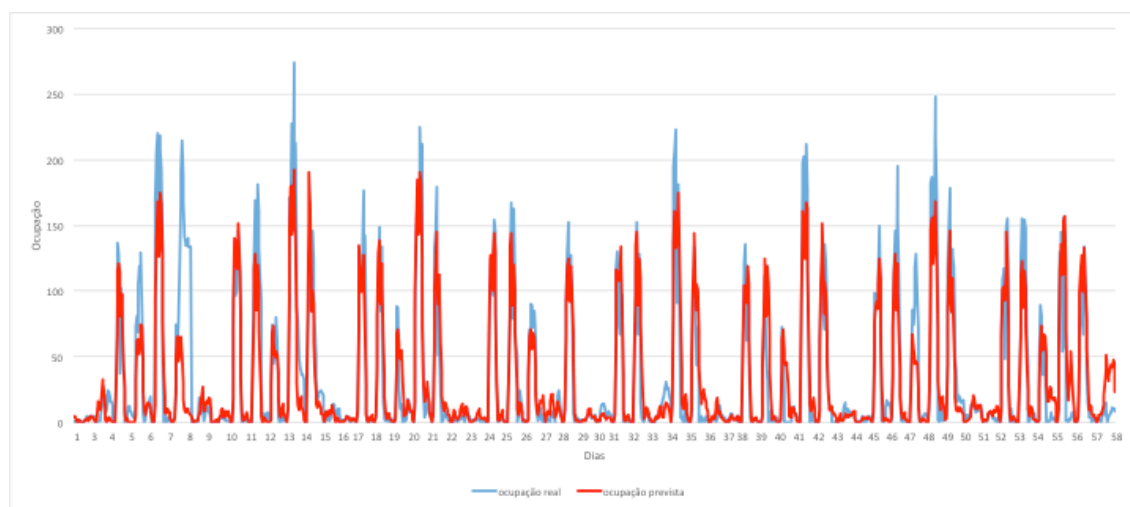


**Figura 95 - Resultado da simulação em *Matlab* com ANN do perfil de pessoas por carro.**

Os resultados representados na Figura 95 dizem respeito a oito semanas. De forma a estender-se este modelo para a obtenção da ocupação do edifício para nove meses, obteve-se um perfil geral semanal, estabelecendo a média de pessoas por veículo a cada dia da semana. Esse perfil geral semanal foi aplicado aos dados de lotação do parque de nove meses, obtendo-se assim a previsão de ocupação do edifício nesses nove meses.

Para efeitos de validação desta abordagem desenvolveu-se um modelo idêntico à referida, anteriormente, neste ponto, com os dados de apenas seis semanas. Pretende-se assim verificar se a ocupação prevista para as semanas que não foram consideradas no modelo é semelhante à real. Os resultados estão representados na Figura 96 onde a primeira e a última semanas não foram incluídas na previsão.

Verifica-se que para as semanas da Figura 96 a previsão se aproxima bastante dos valores reais, pelo que é um indicador de que o método utilizado é adequado e válido.



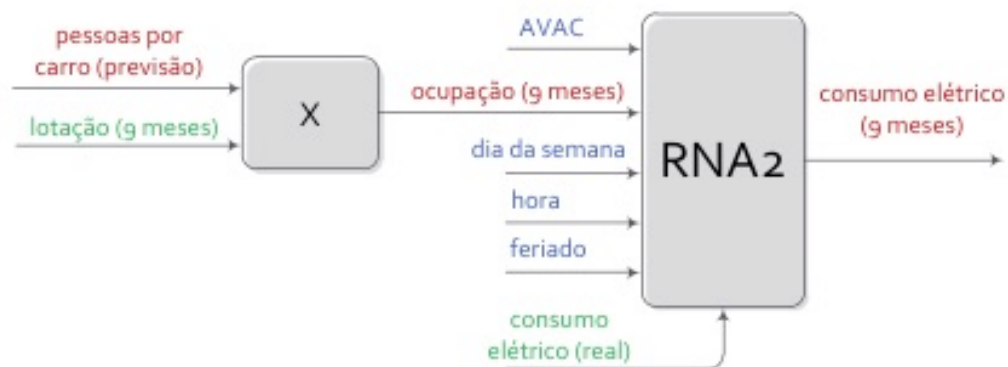
**Figura 96 - Perfil de ocupação real (a azul) vs previsto (a vermelho).**

#### 4.5.6.2. Influência do conjunto contexto temporal e da ocupação no consumo elétrico do edifício

Uma vez obtidos os resultados referidos no ponto anterior e obtida daí a ocupação do edifício para nove meses, foi desenvolvido um modelo para o consumo elétrico, com base num histórico de consumo para o mesmo período.

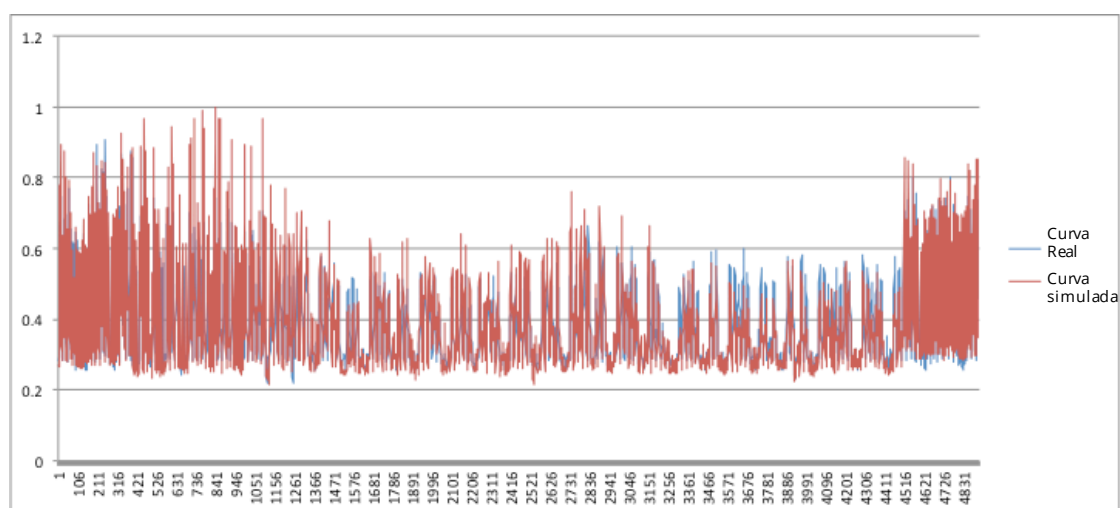
Como parâmetros de entrada da rede utilizou-se o dia da semana, se o dia é feriado, a hora do dia e o número de pessoas, este último obtido por extrapolação.





**Figura 97 - Configuração da ANN utilizada para efetuar a previsão do consumo elétrico do edifício para 9 meses.**

O resultado do produto entre a média semanal da previsão do número de pessoas por carro e a lotação do parque para nove meses corresponde à ocupação prevista para o edifício num período de nove meses.



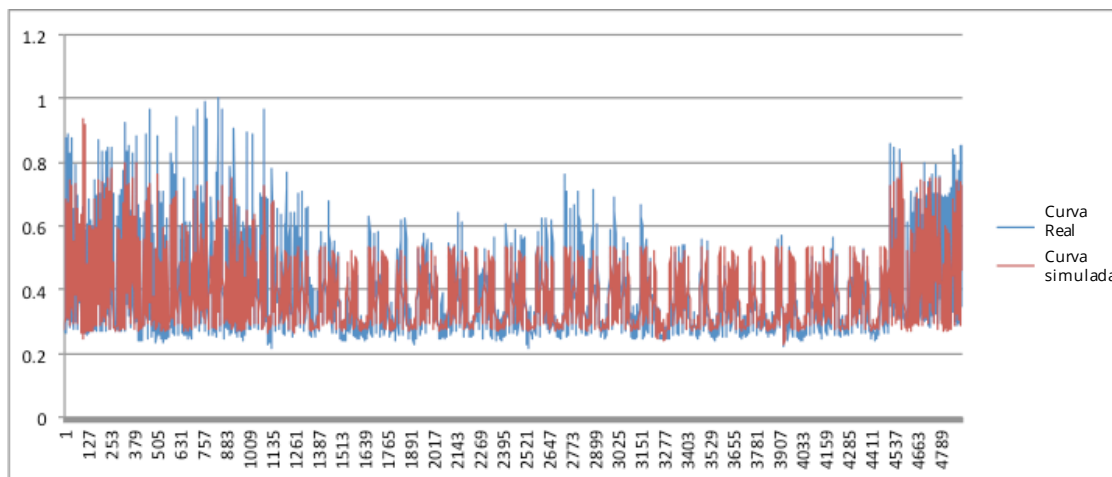
**Figura 98 - Resultado do modelo para a previsão do consumo elétrico do edifício.**

Os resultados estão representados na Figura 98, com o consumo real apresentado a azul e o consumo previsto a vermelho. Verifica-se que as curvas são, praticamente, coincidentes.

#### 4.5.6.3. Influência do contexto temporal no consumo elétrico do edifício

De forma a estudar-se a relevância da ocupação para a modelização do consumo elétrico do edifício procedeu-se ao estudo de modelização do consumo unicamente através da utilização do contexto temporal.

Como parâmetros de entrada da rede utilizou-se, novamente, o dia da semana, se o dia é feriado e a hora do dia, excluindo desta vez o número de pessoas.



**Figura 99 - Resultado do modelo para a previsão do consumo elétrico do edifício sem os dados da ocupação para treino.**

Utilizando apenas informação sobre o contexto temporal observa-se que existe uma perda significativa de precisão do modelo e que a curva da simulação apresenta um comportamento consideravelmente pior, afastando-se bastante da curva de consumo real.

Na Tabela 3 encontram-se os resultados dos dois estudos de modelização do consumo elétrico do edifício. Constata-se que o valor de MSE é baixo para ambos os estudos, o que indica que o contexto temporal e a ocupação permitem modelizar o consumo elétrico. No entanto, verifica-se que existe apenas uma melhoria pouco significativa com a conjugação de informação sobre a ocupação do edifício, pelo que esta não é tão relevante como o contexto temporal para a modelização do consumo elétrico.

**Tabela 3 – Resumo de resultados das várias instâncias quantitativas para o sistema de aproveitamento solar fotovoltaico.**

<b><i>Parâmetros de Entrada (ANN)</i></b>	<b><i>MSE</i></b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Hora do dia</i></li> <li>• <i>Dia da semana</i></li> <li>• <i>Feriados</i></li> </ul>	6.12E-3
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Hora do dia</i></li> <li>• <i>Dia da semana</i></li> <li>• <i>Feriados</i></li> <li>• <i>Ocupação</i></li> </ul>	5.715E-3

## 4.6. Validação do modelo conceptual

Os casos de aplicação, descritos nas secções anteriores, englobam a instanciação do modelo conceptual para diferentes sistemas que influenciam o balanço energético em edifícios. De acordo com a questão de investigação enunciada em 1.2, pretende-se desenvolver modelos e ferramentas de modelização em edifícios, no âmbito do balanço energético, adequados ao desenvolvimento de modelos de simulação escaláveis e de complexidade gradual.

A primeira hipótese enunciada na Secção 1.2, assume que a especificação de modelos conceptuais, que descrevam os vários subsistemas que estão presentes em edifícios, no contexto da energia, permite o desenvolvimento de modelos de simulação de sistemas que possibilitam determinar o balanço de energia desses edifícios. Neste seguimento, verifica-se que é possível modelizar os vários sistemas considerados na Secção 4, a partir dos conceitos e do processo de instanciação proposto, descritos na Secção 3.4. A descrição do submodelo, referida na Secção 3.4.3, permitiu formular uma base de componentes de acordo com os conceitos e respectivas relações entre conceitos, especificados na Secção 3.3.2, para os diferentes sistemas. O processo de instanciação qualitativo, apresentado na Secção 3.4.4, permitiu caracterizar, analisar e modelizar, qualitativamente e de forma sistematizada, quais as entradas e saídas dos diversos submodelos. Esta caracterização foi fundamental para o desenvolvimento de modelos de simulação qualitativos que consideram determinadas variáveis de entrada provadas relevantes para as saídas especificadas.

Os resultados obtidos nos estudos de modelização e simulação quantitativos, nos vários casos de aplicação analisados, também estão em linha com a segunda hipótese enunciada na Secção 1.2, onde é sugerida a adoção de uma abordagem de submodelização para facilitar a escalabilidade e abrangência gradual do processo de modelização. A abordagem de submodelização provou facilitar o processo de modelização e a respetiva escalabilidade, em particular no caso de aplicação do consumo elétrico do edifício do DEE, descrito na Secção 4.5, onde são desenvolvidos e utilizados dois submodelos individuais na modelização de um sistema com relativa complexidade. A heterogeneidade dos casos de aplicação permitiu validar a abrangência do modelo conceptual proposto. O mesmo modelo conceptual, e respetivo processo de instanciação provou ser adequado à modelização de diferentes sistemas, com diferentes variáveis de entrada e saída, e que influenciam o balanço energético em edifícios. Os resultados obtidos permitem, também, validar as considerações feitas na Secção 3.3.2 sobre as relações entre os conceitos de contexto, dispositivo, edifício, utilizador e energia.



## Capítulo 5

# Conclusões

### 5.1. Visão geral da tese

Este capítulo resume as contribuições da investigação decorrente desta tese de doutoramento, no âmbito da modelização conceptual do balanço energético em edifícios. É feito um resumo do trabalho realizado e são apresentadas as contribuições técnicas e científicas, de acordo com a questão de investigação e hipótese consideradas na Secção 1.2. Por último, são ainda discutidos os trabalhos futuros relacionados com esta tese.

Este trabalho teve como foco a modelização de sistemas, que fazem parte ou afetam de alguma forma um edifício, em termos do seu balanço energético. Na literatura existem algumas abordagens de modelização conceptual de sistemas que têm impacto no balanço energético em edifícios. Contudo, as abordagens analisadas apresentam algumas limitações ao nível da abstração do sistema a modelizar, do foco na modelização energética em edifícios, da aptidão para instanciação qualitativa e quantitativa e da abordagem de submodelização. Vários autores desenvolveram modelos de simulação para balanço energético em edifícios considerando variáveis, e respetivas relações entre elas, relacionadas com os seguintes conceitos: o próprio edifício, o contexto onde este se insere, os seus utilizadores e os vários equipamentos/sistemas instalados.

De acordo com a questão de investigação que está na origem deste trabalho, e descrita na Secção 1.2, propôs-se uma metodologia para o desenvolvimento de *“(...)modelos e ferramentas de modelização, para simulação do balanço energético em edifícios, com escalabilidade ao nível da sua complexidade e abrangência”*.

- Esta metodologia assenta na hipótese, formulada também Secção 1.2, de que *“Se o balanço energético de um edifício resulta da influência conjunta dos vários sistemas que o constituem, com utilização e especificação de sub-modelos conceptuais que descrevam esses vários sistemas no contexto da energia então será possível desenvolver modelos e ferramentas de modelização de complexidade e abrangência gradual”*.

A referida hipótese pressupõe, como maior desafio, o desenvolvimento de um modelo conceptual abrangente, que apresente um nível de abstração suficiente para englobar a diversidade de sistemas que intervêm no âmbito do balanço energético em edifícios, que se adapte às necessidades de modelização para estes sistemas, e que seja escalável, em termos da reutilização de modelos de menos abrangentes no desenvolvimento de modelos mais abrangentes.

A validação da referida hipótese esta alicerçada nos seguintes desenvolvimentos:

- 1) Foi especificado um modelo conceptual que abstrai os principais conceitos dos sistemas que têm impacto no balanço energético em edifícios, assim como as relações que, de forma inerente ao edifício e a estes sistemas, existem entre esses conceitos (Secção 3.3). Os conceitos e respetivas relações advêm de uma extensa revisão do estado da arte ao nível de modelização energética em edifícios (Secção 2). De facto, para os casos de aplicação considerados nesta tese, validou-se que os sistemas podem ser representados pelos conceitos definidos no modelo conceptual proposto, assim como pelas suas relações (Secções 4.3.2, 4.4.2 e 4.5.2).
- 2) Foi desenvolvida uma abordagem de submodelização, com base na instanciação de submodelos qualitativos e quantitativos, aplicável ao universo de sistemas em edifícios que influenciam o seu balanço energético, e escalável, potenciando o desenvolvimento de modelos de simulação gradualmente mais complexos (Secção 3.4). Com a abordagem de submodelização baseada em submodelos qualitativos e quantitativos, os subsistemas são modelizados através de submodelos individuais que podem ser organizados em conjuntos para formar modelos de sistemas compostos por diversos subsistemas. Demonstrou-se que esta abordagem facilita os processos de modelização, em particular para os casos de aplicação do modelo conceptual. No caso de aplicação “Consumo elétrico de um edifício”, descrito na Secção 4.5, foi abordado um exemplo da modelização de um sistema através da conjugação de dois submodelos individuais, onde é demonstrada a escalabilidade do processo de submodelização.

Os passos e validações referidas permitem validar a hipótese considerada, sendo assim possível considerar o desenvolvimento de modelos e ferramentas de modelização, para simulação do balanço energético em edifícios, com escalabilidade ao nível da sua complexidade e abrangência.

## 5.2. Resultados

Os resultados obtidos nesta tese de doutoramento podem ser divididos em duas categorias: científicos e técnicos.

O principal resultado científico concretizado nesta tese de doutoramento assenta no modelo conceptual desenvolvido, e respetivo processo de modelização, para sistemas no âmbito da modelização do balanço energético em edifícios. Foi desenvolvido um modelo conceptual assente em cinco conceitos fundamentais: edifício, utilizador, dispositivo, contexto e energia. Este modelo conceptual define ainda as diversas relações entre os conceitos considerados. É proposto um processo de modelização que assenta na instanciação do modelo conceptual e das relações entre conceitos. Este processo de modelização assenta em três fases complementares, nomeadamente: descrição do modelo, instanciação qualitativa e instanciação quantitativa. Com o intuito de simplificar a abordagem desenvolvida, foi ainda proposta uma abordagem de submodelização para este processo, desagregando modelos mais alargados em submodelos complementares de menor abrangência.

Como resultados científicos, foram submetidos para publicação três artigos de revista, estando já dois publicados e um em processo de impressão, e onze artigos publicados em conferências científicas internacionais. Estas publicações encontram-se descritas na Tabela 4.

Ano	Título	Tipo	Estado
2015	V. Delgado-Gomes, J. A. Oliveira-Lima, J. F. Martins, "Energy consumption awareness in manufacturing production systems ", International Journal of Computer Integrated Manufacturing	Artigo de revista	Aceite
2015	J.A. Oliveira-Lima, Ramiro M. M. Morais, João. F. Martins, Adrian Florea and Celson Lima, "Load forecasting on intelligent buildings based on short-term coverage occupancy monitoring", Energy and Buildings, Elsevier	Artigo de revista	Publicado
2014	J.A. Oliveira-Lima, V. Delgado-Gomes, J.F. Martins, C. Lima, "Standard-based Service-oriented Infrastructure to Integrate Intelligent Buildings in Distributed Generation and Smart Grids", Energy and Buildings volume 76, 2014, pp. 450 – 458, Elsevier.	Artigo de revista	Publicado
2015	Miguel Taborda, João Almeida, José A. Oliveira-Lima, João F. Martins, "Towards a web-based energy consumption forecasting platform", CPE 2015, Lisbon, IEEE	Artigo de conferência	Publicado

<b>2015</b>	Ruben Costa, Pedro Gomes de Oliveira, José Lima, João Sarraipa and Ricardo Jardim-Gonçalves, "Domain Ontology to Support Open Data Analytics for Aquaculture", KEOD 2015, Lisbon, Springer.	Artigo de conferencia	Aceite
<b>2013</b>	V. Delgado-Gomes, J.A. Oliveira-Lima, C. Lima, J.F. Martins, R. Jardim-Gonçalves and V. Fernão Pires, "Energy Consumption Evaluation to Reduce Manufacturing Costs", in International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2013, 13-17 May, Istanbul, Turkey.	Artigo de conferência	Publicado
<b>2013</b>	Vasco Delgado-Gomes, José A. Oliveira-Lima, João F. Martins and Ricardo Jardim-Gonçalves, "Towards a Service Bus for Distributed Manufacturing," in 11th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics, Rhodes, Greece, 21-27 September, 2013.	Artigo de conferência	Publicado
<b>2013</b>	J.A. Oliveira-Lima, V. Delgado-Gomes, J.F. Martins, C. Lima, E. Romero-Cadaval and D. Vinnikov. "A Standard-based Software Infrastructure to Support Weather Forecasting in Distributed Energy Systems", in 8th International Conference-Workshop on Compatibility and Power Electronics (CPE), 2013, 5-7 June, Ljubljana, Slovenia.	Artigo de conferência	Publicado
<b>2012</b>	João F. Martins, José A. Oliveira-Lima, Vasco Delgado-Gomes, and Celson Lima, "Smart Homes and Smart Buildings," in IEEE 13th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC 2012), Tallin, Estonia, 3-5 October, 2012.	Artigo de conferência	Publicado
<b>2012</b>	Vasco Delgado-Gomes, José A. Oliveira-Lima, João F. Martins and Celson Lima, "A Standard-Based Software Infrastructure to Support Energy Storage in Distributed Energy Systems," in 1st International Conference on Smart Grids and Green IT Systems (SmartGreens 2012), Porto, Portugal, 19-20 April 2012.	Artigo de conferência	Publicado
<b>2012</b>	Vasco Delgado-Gomes, José A. Oliveira-Lima, João F. Martins, Celson Lima and Pedro Pereira, "Towards to	Artigo de	Publicado



	a Web Service Alert Software System for Standard Electrical Protective Devices," in IEEE 16th International Conference on Intelligent Engineering Systems 2012 (INES 2012), Lisbon, Portugal, 13-15 June 2012.	conferência	
<b>2012</b>	José A. Oliveira-Lima, João F. Martins, Celson Lima, Vasco Delgado-Gomes, João Murta Pina and Grzegorz Benysek, "Towards an Energy Model for Supporting Real Time Building Energy Management," in IEEE 16th International Conference on Intelligent Engineering Systems 2012 (INES 2012), Lisbon, Portugal, 13-15 June 2012.	Artigo de conferência	Publicado
<b>2012</b>	J. Lima, V. Gomes, J. Martins, and C. Lima, "A standard-based software infrastructure to support power system protection in distributed energy systems," in Technological Innovation for Value Creation, ser. IFIP Advances in Information and Communication Technology, L. Camarinha-Matos, E. Shahamatnia, and G. Nunes, Eds. Springer Boston, 2012, vol. 372, 2012, pp. 355–362.	Artigo de conferência	Publicado
<b>2011</b>	Lima, J., C. Lima, et al. DPWS as Specific Communication Service Mapping for IEC 61850. 9th IEEE International Conference in Industrial Informatics (INDIN 11), IEEE (2011).	Artigo de conferência	Publicado
<b>2011</b>	Lima, C., V. Gomes, et al. A Standard-based Software Infrastructure to Support Energy Efficiency using Renewable Energy Sources. IEEE International Symposium in Industrial Electronics. Gdansk, Poland, IEEE (2011).	Artigo de conferência	Publicado

**Tabela 4 – Resumo de publicações de artigos científicos.**

Relativamente aos resultados técnicos, foi desenvolvida uma ferramenta para desenvolvimento de modelos de simulação que facilitam a transposição de instâncias do modelo conceptual para um ambiente computacional.

Foi também desenvolvida uma plataforma de aquisição e visualização de leituras de energia, água e gás. Esta plataforma assenta num sistema de aquisição de leituras baseada em protocolos de comunicação *standard*, conjuntamente com uma aplicação *Web* onde são armazenados e podem ser consultados os dados referentes a consumos do edifício.

### 5.3. Trabalho futuro

Os resultados obtidos nesta tese de doutoramento indicam que o modelo conceptual e a abordagem de modelização propostos permitem modelizar sistemas que têm impacto no balanço energético de edifícios. Contudo, de forma a se obterem conclusões mais concretas sobre o seu desempenho, espera-se conduzir estudos que tenham em conta métricas adicionais, que permitam tirar conclusões quanto a:

- Aplicabilidade do modelo conceptual à modelização de sistemas que influenciam o balanço energético em edifícios, ou seja, identificar a existência, ou não, de limitações da utilização do modelo conceptual no universo destes sistemas. Esta validação deverá incluir um levantamento exaustivo de todo o tipo de sistemas que afetam o balanço energético do edifício, a aplicação da abordagem de modelização a estes tipos de sistemas e respetiva simulação e, finalmente, a comparação dos resultados obtidos com modelos desenvolvidos em ferramentas de simulação existentes (como por exemplo, o EnergyPlus ou o TRNSYS).
- Escalabilidade dos submodelos desenvolvidos com base no modelo conceptual e na abordagem de submodelização. É necessário aferir, qualitativamente, se os submodelos são reutilizáveis e integráveis com outros submodelos, e de que forma esta integração pode ou não ser feita, em termos de granularidade da modelização.
- Simplificação do desenvolvimento de modelos de simulação, com a avaliação da rapidez do processo de modelização, o consumo de recursos computacionais na simulação e, por último, a partir da aferição da precisão dos resultados de simulação com dados reais e com dados obtidos a partir de outras ferramentas de modelização e simulação.

Por último, será interessante contribuir para a aplicação dos resultados obtidos em SGEs, potenciando o desenvolvimento e integração de modelos de simulação que se adaptem, dinamicamente, à realidade dos sistemas que influenciam o balanço energético do edifício, melhorando o suporte à decisão dos gestores de edifícios. Neste âmbito, espera-se desenvolver ferramentas de modelização e simulação dinâmicas, com base no trabalho desta tese de doutoramento, e integrá-los em SGEs (como por exemplo o *Wemeter*).

## Bibliografia

- [1] IEA, *Transition to Sustainable Buildings: Strategies and opportunities 2050*. IEA, 2013.
- [2] World Business Council for Sustainable Development, *Transforming the Market: Energy Efficiency in Buildings*. 2013.
- [3] D. Kolokotsa, D. Rovas, E. Kosmatopoulos, and K. Kalaitzakis, "A roadmap towards intelligent net zero- and positive-energy buildings," *Sol. Energy*, Oct. 2010.
- [4] D. Coakley, P. Raftery, and M. Keane, "A review of methods to match building energy simulation models to measured data," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 37, pp. 123–141, Sep. 2014.
- [5] D. B. Crawley, J. W. Hand, M. Kummert, and B. T. Griffith, "Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs," *Build. Environ.*, vol. 43, no. 4, pp. 661–673, Apr. 2008.
- [6] N. Fumo, "A review on the basics of building energy estimation," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 31, pp. 53–60, Mar. 2014.
- [7] M. Cellura, F. Guarino, S. Longo, and M. Mistretta, "Different energy balances for the redesign of nearly net zero energy buildings: An Italian case study," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 45, pp. 100–112, May 2015.
- [8] A. Mohamed, A. Hasan, and K. Sirén, "Fulfillment of net-zero energy building (NZEB) with four metrics in a single family house with different heating alternatives," *Appl. Energy*, vol. 114, pp. 385–399, Feb. 2014.
- [9] W. Yan Cheng and J. Yao, "Research on the optimization of building energy efficient measures based on incremental costs," in *2010 2nd International Conference on Com-*

puter Engineering and Technology, 2010, pp. V6–184–V6–187.

- [10] C. Diakaki, E. Grigoroudis, N. Kabelis, D. Kolokotsa, K. Kalaitzakis, and G. Stavrakakis, "A multi-objective decision model for the improvement of energy efficiency in buildings," *Energy*, vol. 35, no. 12, pp. 5496–5483, Aug. 2010.
- [11] V. HARTKOPF, "An integrated approach to design and engineering of intelligent buildings?The Intelligent Workplace at Carnegie Mellon University," *Autom. Constr.*, vol. 6, no. 5–6, pp. 401–415, Sep. 1997.
- [12] A. Gligor, H. Grif, and S. Oltean, *Considerations on an Intelligent Buildings Management System for an Optimized Energy Consumption*. IEEE, 2006.
- [13] R. Lindberg, M. Korpi, and J. Vinha, "Factors affecting energy consumption of buildings."
- [14] A. Arbor, "IMPACT OF INSULATION ON BUILDING ENERGY CONSUMPTION Jong-Jin Kim and Jin Woo Moon," pp. 674–680, 2009.
- [15] T. Catalina, J. Virgone, and E. Blanco, "Development and validation of regression models to predict monthly heating demand for residential buildings," *Energy Build.*, vol. 40, pp. 1825–1832, 2008.
- [16] M. P. Rodrigues, "EVOLUÇÃO DA REGULAMENTAÇÃO TÉRMICA DE EDIFÍCIOS - Estudo Comparativo." 2014.
- [17] A. I. Dounis and C. Caraiscos, "Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment—A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 6–7, pp. 1246–1261, Aug. 2009.
- [18] ASHRAE Handbook, "Fundamentals," *Am. Soc. Heating, Refrig. Air Cond. Eng. Atlanta*, 2005.
- [19] S. Emmerich and A. Persily, "State-of-the-Art Review of CO2 Demand Controlled Ventilation Technology and Application," *National Inst. Stand. Technol.*, 2001.
- [20] P. O. FANGER, "Thermal comfort. Analysis and applications in environmental enginee-

ring.,” 1970.

- [21] B. T. Program and E. Efficiency, “2011 Buildings Energy Data Book.”
- [22] A. I. D. E. L. Energie, “ENERGY EFFICIENCY IN THE NORTH AMERICAN EXISTING BUILDING STOCK,” *Energy*, no. July, 2007.
- [23] IEA, *Energy Technology Perspectives: Scenarios & Strategies to 2050*. 2010.
- [24] H. Li and Q. Zhang, “Reducing Air-Conditioning System Energy Using a PMV Index,” 2006.
- [25] S. M. Joshi, “The sick building syndrome.,” *Indian J. Occup. Environ. Med.*, vol. 12, no. 2, pp. 61–4, Aug. 2008.
- [26] S. Wang and X. Xu, “Optimal and robust control of outdoor ventilation airflow rate for improving energy efficiency and IAQ,” *Build. Environ.*, vol. 39, no. 7, pp. 763–773, Jul. 2004.
- [27] A. Al-Mumin, “Occupants’ behavior and activity patterns influencing the energy consumption in the Kuwaiti residences,” *Energy Build.*, vol. 35, no. 6, pp. 549–559, Jul. 2003.
- [28] P. Barooah, “An integrated approach to occupancy modeling and estimation in commercial buildings,” in *Proceedings of the 2010 American Control Conference*, 2010, pp. 3130–3135.
- [29] J. A. Davis and D. W. Nutter, “Occupancy diversity factors for common university building types,” *Energy Build.*, vol. 42, no. 9, pp. 1543–1551, Sep. 2010.
- [30] D. Robinson, “Some trends and research needs in energy and comfort prediction,” 2006.
- [31] F. Oldewurtel, D. Sturzenegger, and M. Morari, “Importance of occupancy information for building climate control,” *Appl. Energy*, vol. 101, pp. 521–532, Jan. 2013.

- [32] A. Marvuglia and A. Messineo, "Using Recurrent Artificial Neural Networks to Forecast Household Electricity Consumption," *Energy Procedia*, vol. 14, pp. 45–55, Jan. 2012.
- [33] M. Sarkar, "A new theoretical formulation of dew point temperatures applicable for comfort air-cooling systems," *Energy Build.*, vol. 86, pp. 243–256, Jan. 2015.
- [34] S. Jaber and S. Ajib, "Evaporative cooling as an efficient system in Mediterranean region," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 31, no. 14–15, pp. 2590–2596, Oct. 2011.
- [35] M. Abuku, H. Janssen, and S. Roels, "Impact of wind-driven rain on historic brick wall buildings in a moderately cold and humid climate: Numerical analyses of mould growth risk, indoor climate and energy consumption," *Energy Build.*, vol. 41, no. 1, pp. 101–110, Jan. 2009.
- [36] R. Lindberg, A. Binamu, and M. Teikari, "Five-year data of measured weather, energy consumption, and time-dependent temperature variations within different exterior wall structures," *Energy Build.*, vol. 36, no. 6, pp. 495–501, Jun. 2004.
- [37] M. C. Leung, N. C. F. Tse, L. L. Lai, and T. T. Chow, "The use of occupancy space electrical power demand in building cooling load prediction," *Energy Build.*, no. 2010, Aug. 2012.
- [38] D. H. . Li and J. C. Lam, "Analysis of solar heat gain factors using sky clearness index and energy implications," *Energy Convers. Manag.*, vol. 42, no. 5, pp. 555–571, Mar. 2001.
- [39] L. Shi, M. Yit, and L. Chew, "A review on sustainable design of renewable energy systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 1, pp. 192–207, 2012.
- [40] F. Hammad and B. Abu-Hijleh, "The energy savings potential of using dynamic external louvers in an office building," *Energy Build.*, vol. 42, no. 10, pp. 1888–1895, Oct. 2010.
- [41] K. Wojdyga, "An influence of weather conditions on heat demand in district heating systems," *Energy Build.*, vol. 40, no. 11, pp. 2009–2014, Jan. 2008.
- [42] G. Chicco and P. Mancarella, "Distributed multi-generation: A comprehensive view," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 3, pp. 535–551, Apr. 2009.

- [43] Y. X. He, Y. Y. Liu, T. Xia, and B. Zhou, "Estimation of demand response to energy price signals in energy consumption behaviour in Beijing, China," *Energy Convers. Manag.*, vol. 80, pp. 429–435, 2014.
- [44] J. Sharp, "Comparative models for electrical load forecasting : D.H. Bunn and E.D. Farmer, eds.(Wiley, New York, 1985) [UK pound]24.95, pp. 232," *Int. J. Forecast.*, vol. 2, no. 2, pp. 241–242, 1986.
- [45] V. M. Zavala, E. M. Constantinescu, T. Krause, and M. Anitescu, "On-line economic optimization of energy systems using weather forecast information," *J. Process Control*, vol. 19, no. 10, pp. 1725–1736, Dec. 2009.
- [46] L. Lu and K. Sun, "Wind power evaluation and utilization over a reference high-rise building in urban area," *Energy Build.*, vol. 68, pp. 339–350, Jan. 2014.
- [47] B. Wang, L. D. Cot, L. Adolphe, S. Geoffroy, and J. Morchain, "Estimation of wind energy over roof of two perpendicular buildings," *Energy Build.*, vol. 88, pp. 57–67, Feb. 2015.
- [48] A. Carvalho, A., Quintino, A., Fong, J., & De Almeida, "Thermal storage coupled to a ground source heat pump in a public services building," *J. Sustain. Energy*, vol. 3, no. 4, 2012.
- [49] J.-H. Tsai, C.-P. Wu, and H.-C. Chang, "An investigation of geothermal energy applications and assisted air-conditioning system for energy conservation analysis," *Geothermics*, vol. 50, pp. 220–226, Apr. 2014.
- [50] H. Brandl, "Energy piles concepts," in *Deep Foundations on Bored and Auger Piles - BAP V*, CRC Press, 2008, pp. 77–95.
- [51] B. Morrone, G. Coppola, and V. Raucci, "Energy and economic savings using geothermal heat pumps in different climates," *Energy Convers. Manag.*, vol. 88, pp. 189–198, Dec. 2014.
- [52] Q. Shilin, S. Zhifeng, F. Huifang, and L. Kun, "BP Neural Network for the Prediction of Urban Building Energy Consumption Based on Matlab and its Application," in *2010 Se-*

cond International Conference on Computer Modeling and Simulation, 2010, vol. 2, pp. 263–267.

- [53] M. Hart and R. de Dear, “Weather sensitivity in household appliance energy end-use,” *Energy Build.*, vol. 36, no. 2, pp. 161–174, Feb. 2004.
- [54] P. A. González and J. M. Zamarreño, “Prediction of hourly energy consumption in buildings based on a feedback artificial neural network,” *Energy Build.*, vol. 37, no. 6, pp. 595–601, Jun. 2005.
- [55] J. SEEM, “Pattern recognition algorithm for determining days of the week with similar energy consumption profiles,” *Energy Build.*, vol. 37, no. 2, pp. 127–139, Feb. 2005.
- [56] R. Rasjidin, A. Kumar, F. Alam, and S. Abosuliman, “A System Dynamics Conceptual Model on Retail Electricity Supply and Demand System to Minimize Retailer’s Cost in Eastern Australia,” *Procedia Eng.*, vol. 49, pp. 330–337, Jan. 2012.
- [57] S. Al-Zyoud, W. Rühaak, and I. Sass, “Dynamic numerical modeling of the usage of groundwater for cooling in north east Jordan – A geothermal case study,” *Renew. Energy*, vol. 62, pp. 63–72, Feb. 2014.
- [58] A. D. Carvalho, P. Moura, G. C. Vaz, and A. T. de Almeida, “Ground source heat pumps as high efficient solutions for building space conditioning and for integration in smart grids,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 103, pp. 991–1007, Oct. 2015.
- [59] J. L. Casteleiro-Roca, J. L. Calvo-Rolle, M. C. Meizoso-López, A. J. Piñón-Pazos, and B. A. Rodríguez-Gómez, “Bio-inspired model of ground temperature behavior on the horizontal geothermal exchanger of an installation based on a heat pump,” *Neurocomputing*, vol. 150, pp. 90–98, Feb. 2015.
- [60] A. Al-Mumin, O. Khattab, and G. Sridhar, “Occupants’ behavior and activity patterns influencing the energy consumption in the Kuwaiti residences,” *Energy Build.*, vol. 35, no. 6, pp. 549–559, Jul. 2003.
- [61] A. Ioannou and L. C. M. Itard, “Energy Performance and comfort in residential buildings: Sensitivity for building parameters and occupancy,” *Energy Build.*, Feb. 2015.



- [62] Z. Yu, B. C. M. Fung, F. Haghighat, H. Yoshino, and E. Morofsky, "A systematic procedure to study the influence of occupant behavior on building energy consumption," *Energy Build.*, vol. 43, no. 6, pp. 1417–1409, Feb. 2011.
- [63] J. Karlsson, L. Wadsö, and M. Öberg, "A conceptual model that simulates the influence of thermal inertia in building structures," *Energy Build.*, vol. 60, pp. 146–151, May 2013.
- [64] D. Kolokotsa, C. Diakaki, E. Grigoroudis, G. Stavrakakis, and K. Kalaitzakis, "Decision support methodologies on the energy efficiency and energy management in buildings," *Adv. Build. Energy Res.*, vol. 3, no. 1, pp. 121–146, Jan. 2009.
- [65] P. Pärish, O. Mercker, P. Oberdorfer, E. Bertram, R. Tepe, and G. Rockendorf, "Short-term experiments with borehole heat exchangers and model validation in TRNSYS," *Renew. Energy*, vol. 74, pp. 471–477, Feb. 2015.
- [66] F. Kuznik, J. Virgone, and K. Johannes, "Development and validation of a new TRNSYS type for the simulation of external building walls containing PCM," *Energy Build.*, vol. 42, no. 7, pp. 1004–1009, Jul. 2010.
- [67] C. Tian, T. Chen, and T. Chung, "Experimental and simulating examination of computer tools, Radlink and DOE2, for daylighting and energy simulation with venetian blinds," *Appl. Energy*, vol. 124, pp. 130–139, Jul. 2014.
- [68] L. Pasqualetto, R. Zmeureanu, and P. Fazio, "A case study of validation of an energy analysis program: MICRO-DOE2.1E," *Build. Environ.*, vol. 33, no. 1, pp. 21–41, Jan. 1998.
- [69] N. M. Mateus, A. Pinto, and G. C. da Graça, "Validation of EnergyPlus thermal simulation of a double skin naturally and mechanically ventilated test cell," *Energy Build.*, vol. 75, pp. 511–522, Jun. 2014.
- [70] J. W. Chuah, A. Raghunathan, and N. K. Jha, "ROBESim: A retrofit-oriented building energy simulator based on EnergyPlus," *Energy Build.*, vol. 66, pp. 88–103, Nov. 2013.
- [71] R. Zhang, K. P. Lam, S. Yao, and Y. Zhang, "Coupled EnergyPlus and computational fluid dynamics simulation for natural ventilation," *Build. Environ.*, vol. 68, pp. 100–113, Oct. 2013.

- [72] S. Atthajariyakul and T. Leephakpreeda, "Real-time determination of optimal indoor-air condition for thermal comfort, air quality and efficient energy usage," *Energy Build.*, vol. 36, no. 7, pp. 720–733, Jul. 2004.
- [73] G. I. Giannakis, G. D. Kontes, E. B. Kosmatopoulos, and D. V. Rovas, "A model-assisted adaptive controller fine-tuning methodology for efficient energy use in buildings," in *2011 19th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED)*, 2011, pp. 49–54.
- [74] G. Lopez, P. Moura, M. Sikora, J. I. Moreno, and A. T. de Almeida, "Comprehensive validation of an ICT platform to support energy efficiency in future smart grid scenarios," in *2011 IEEE International Conference on Smart Measurements of Future Grids (SMFG) Proceedings*, 2011, pp. 113–118.
- [75] N. Sakkas, P. Philimis, A. Carrascal, M. Ramiro, T. Messerve, and M. Kouveletsou, "Simulation and control of renewable energy technology integrated within building energy management," pp. 1–8.
- [76] S. Robinson, "Conceptual Modelling : Who Needs It?," *SCS M&S Magazine*, pp. 1–7, 2010.
- [77] "conceptual model," *Miller-Keane Encyclopedia and Dictionary of Medicine, Nursing, and Allied Health*. Elsevier, 2003.
- [78] G. Muller, "Teaching Conceptual Modeling at Multiple System Levels Using Multiple Views," *Procedia CIRP*, vol. 21, pp. 58–63, 2014.
- [79] M. K. Dixit, C. H. Culp, and J. L. Fernández-Solís, "System boundary for embodied energy in buildings: A conceptual model for definition," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 21, pp. 153–164, May 2013.
- [80] J. Karlsson, L. Wadsö, and M. Öberg, "A conceptual model that simulates the influence of thermal inertia in building structures," *Energy Build.*, vol. 60, pp. 146–151, May 2013.
- [81] B. Wilson, *Systems: concepts, methodologies, and applications*. John Wiley & Sons, Inc., 1984.

- [82] D. C. Lane and R. Oliva, "The greater whole: Towards a synthesis of system dynamics and soft systems methodology," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 107, no. 1, pp. 214–235, May 1998.
- [83] R. Rasjidin, A. Kumar, F. Alam, and S. Abosuliman, "A System Dynamics Conceptual Model on Retail Electricity Supply and Demand System to Minimize Retailer's Cost in Eastern Australia," *Procedia Eng.*, vol. 49, pp. 330–337, 2012.
- [84] H. Bouloiz, E. Garbolino, M. Tkiouat, and F. Guarnieri, "A system dynamics model for behavioral analysis of safety conditions in a chemical storage unit," *Saf. Sci.*, vol. 58, pp. 32–40, Oct. 2013.
- [85] S. Movilla, L. J. Miguel, and L. F. Blázquez, "A system dynamics approach for the photovoltaic energy market in Spain," *Energy Policy*, vol. 60, pp. 142–154, Sep. 2013.
- [86] R. Rehan, M. a Knight, a J. a Unger, and C. T. Haas, "Development of a system dynamics model for financially sustainable management of municipal watermain networks," *Water Res.*, vol. 47, no. 20, pp. 7184–205, Dec. 2013.
- [87] P. Checkland, "Soft systems methodology: a thirty year retrospective," *Syst. Res. Behav. Sci.*, vol. 17, no. S1, pp. S11–S58, Nov. 2000.
- [88] E. W. T. Ngai, C. K. M. To, V. S. M. Ching, L. K. Chan, M. C. M. Lee, Y. S. Choi, and P. Y. F. Chai, "Development of the conceptual model of energy and utility management in textile processing: A soft systems approach," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 135, no. 2, pp. 607–617, Feb. 2012.
- [89] N. Khansari, A. Mostashari, and M. Mansouri, "Conceptual Modeling of the Impact of Smart Cities on Household Energy Consumption," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 28, no. Cser, pp. 81–86, 2014.
- [90] P. Checkland, "Systems thinking, systems practice," 1981.
- [91] J. A. Oliveira-Lima, J. F. Martins, C. Lima, V. Delgado-Gomes, J. Murta Pina, and G. Benysek, "Towards an energy model for supporting real time building energy management," in *2012 IEEE 16th International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES)*, 2012, pp. 203–208.

- [92] S. C. Bhattacharyya, *Energy Economics*. London: Springer London, 2011.
- [93] B. Falkenhainer and K. D. Forbus, "Compositional modeling : finding the right model for the job," vol. 51, pp. 95–143, 1991.
- [94] B. Bredeweg, F. Linnebank, A. Bouwer, and J. Liem, "Garp3 — Workbench for qualitative modelling and simulation," *Ecol. Inform.*, vol. 4, no. 5–6, pp. 263–281, Nov. 2009.
- [95] K. Kansou and B. Bredeweg, "Hypothesis assessment with qualitative reasoning: Modeling the Fontestorbes fountain," *Ecol. Inform.*, Nov. 2013.
- [96] K. D. Forbus, "Qualitative Modeling," vol. 6526, no. 07, pp. 361–394, 2008.
- [97] J. A. Oliveira-Lima, V. Delgado-Gomes, J. F. Martins, and C. Lima, "Standard-based service-oriented infrastructure to integrate intelligent buildings in distributed generation and smart grids," *Energy Build.*, vol. 76, pp. 450–458, Jun. 2014.
- [98] H. L. Von Cube and F. Steimle, *Heat Pump Technology*. Elsevier, 2013.